

# ETUDE DE LA FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN PILOTE D'AQUAPONIE DANS LES PAYS DE LA LOIRE

Optimisation Pilote Régional Aquaponie – 2<sup>nd</sup> programme

TRINTIGNAC Pascal<sup>1</sup>, LE BIHAN Véronique<sup>2</sup>, BENOIT Julie<sup>1</sup>, PERROT Lisa<sup>3</sup>,  
GARSI Pierre<sup>3</sup>, FERRE Alain<sup>4</sup>

1 : Syndicat Mixte Aquaculture Pêche Pays de la Loire

2 : Capacités SAS ; Cellule MER

3 : Lycée O. Guichard de Guérande

4 : Agence Régionale pour l'Expérimentation HORTicole Pays de la Loire



DECEMBRE 2018



# Table des matières

Résumé.....	6
Remerciements .....	7
Préambule.....	8
Introduction .....	9
1. Etat des lieux des connaissances sur l'aquaponie et contexte régional .....	11
1.1. Principe de l'aquaponie.....	11
1.1.1. Système d'aquaculture en eau recirculée ou système RAS .....	12
1.1.2. Culture végétale hors-sol.....	13
1.1.3. L'aquaponie, association d'une production aquacole et végétale.....	15
1.2. Contexte économique de l'aquaponie .....	16
1.2.1. Etat des lieux des connaissances économiques liées à l'aquaponie .....	16
1.2.1.1. Rentabilité des systèmes d'aquaponie .....	16
1.2.1.2. Pilotes développés en France .....	17
1.2.2. Contexte économique en Pays de la Loire.....	18
1.2.2.1. Contexte de l'aquaculture en Pays de la Loire.....	18
1.2.2.2. Contexte des cultures hors sol et des cultures végétales en Pays de La Loire .....	19
1.2.2.3. L'aquaponie en Pays de la Loire en 2016-2018.....	19
1.3. Bilan de la veille bibliographique – matrice SWOT.....	20
2. Matériel et méthodes.....	21
2.1. Démarche : OPRA 2 dans la continuité d'OPRA1 .....	21
2.2. Supports techniques du pilote OPRA2.....	22
2.2.1. Unité de traitement de l'eau.....	23
2.2.2. Compartiment piscicole .....	24
2.2.3. Compartiment végétal.....	24
2.2.3.1. Rafts (Deep Water Culture).....	24
2.2.3.2. Serpentin NFT (Nutrient Film Technique).....	24
2.2.3.3. Techniques de culture sur lit de substrats inertes (MFG : Media Filled Growbed) .....	25
2.2.3.4. Colonnes.....	26
2.3. Sélection des espèces.....	26
2.4. Méthodologie de suivi et indicateurs de performance .....	28
2.4.1. Suivi de la qualité de l'eau .....	28
2.4.2. Suivi piscicole .....	29

2.4.3. Suivi végétal .....	29
2.4.4. Entretien du système .....	30
2.5. Méthode d'analyses technico économiques .....	30
2.5.1. Hypothèses d'analyse.....	30
2.5.2. Etude des mises en marché.....	31
2.5.3. Outils techniques.....	32
2.5.4. Méthode de dimensionnement.....	32
2.5.4.1. Végétal.....	33
2.5.4.2. Piscicole.....	34
2.5.5. Hypothèses de scenarios pour les évaluations économiques .....	34
3. Résultats techniques.....	35
3.1. Traitement de l'eau .....	35
3.2. Isolation et aération .....	36
3.3. Lutte biologique.....	37
4. Résultats biologiques .....	39
4.1. Espèces piscicoles .....	39
4.1.1. Sélection des espèces.....	39
4.1.2. Description des espèces.....	40
4.1.2.1. Truites .....	40
4.1.2.2. Sandres.....	41
4.1.3. Résultats de production .....	41
4.1.3.1. Cycle hivernal .....	41
4.1.3.2. Cycle estival .....	45
4.1.3.2. Suivi sanitaire chez les poissons .....	50
4.2. Espèces végétales.....	51
4.2.1. Choix des espèces et des supports .....	51
4.2.1.1. Cycle hivernal .....	51
4.2.1.2. Cycle estival .....	52
4.2.2 Planning de production .....	53
4.2.3 Principaux résultats de production .....	54
4.2.3.1. Paramètres physico chimiques de l'eau .....	54
4.2.3.2. Suivi sanitaire des végétaux.....	55
4.2.3.3. Productions végétales hivernales .....	56
4.2.3.4. Productions végétales estivales.....	58

5. Analyse technico-économique.....	64
5.1. Choix des scénarios .....	64
5.1.1. Volet végétal.....	64
5.1.2. Volet piscicole .....	65
5.2. Dimensionnement, produits et charges.....	65
5.2.1. Détermination des rendements et des chiffres d'affaires .....	65
5.2.1.1. Volet végétal : détermination des rendements .....	65
5.2.1.2. Volet piscicole : détermination de la densité de poissons pour nos deux espèces .....	67
5.2.2. Charges .....	70
5.2.2.1. Charges fixes.....	70
5.2.2.2. Charges variables .....	71
5.3. Rentabilités selon les scénarios.....	74
6. Discussion .....	76
6.1. Limites de l'expérimentation.....	76
6.1.1. Pilote .....	76
6.1.2. Récoltes .....	76
6.1.3. RTA.....	76
6.1.4. Influence de l'hypothèse économique initiale.....	76
6.2. Limites de l'aquaponie « Low cost ».....	77
6.2.1. Rentabilité.....	77
6.2.2. Périodes de transition .....	77
6.2.3. Aspects « couplage/découplage » du circuit d'eau.....	77
6.2.4. La gestion des aléas .....	78
6.3. Valorisation des boues .....	79
6.3.1. Valorisation mécanique .....	79
6.3.2. Lombricompostage.....	80
6.4. Réglementation.....	81
6.4.1 Production piscicole .....	82
6.3.1.1. AZS .....	82
6.3.1.2. Iota et/ou installations classées.....	82
6.3.1.3. Espèces produites.....	82
6.4.2. Production végétale .....	82
6.5. Aides à l'investissement .....	83
Conclusion .....	84

Bibliographie.....	85
Sitographie.....	90
Glossaire.....	90
Figures.....	92
Tableaux.....	94
Annexes.....	96
Annexe 1 : protocole de suivis des élevages et des cultures .....	88
Annexe 2 : valeurs de qualité de l'eau à ciblées en aquaponie.....	90
Annexe 3 :différents supports de culture hydroponiques (Benoit, 2016) .....	92
Annexe 4 : résultats d'analyses d'eau avec le laboratoire Inovalys .....	96
Annexe 5 : résultats d'analyses de salades avec le laboratoire Inovalys .....	98
Annexe 6 : table de rationnement aliment TAC .....	100
Annexe 7 : table de rationnement aliment sandre .....	102
Annexe 8 : paramètres Zootechniques élevage de Truites TAC 3n hiver 2016-2017.....	104
Annexe 11 : courbe théorique de croissance sandre en circuit fermé recirculé à 22°C (Percafrance) .....	106
Annexe 12 : paramètres Zootechniques élevage de Sandres été 2017 .....	108
Annexe 13 : analyse statistique corrélation production végétale et température (Benoit, 2016).....	110
Annexe 14 : exemples d'affiches de communication mise en place dans la serre pour la vente directe (Perrot, 2017) .....	114
Annexe 15 : données brutes de calcul de densités initiales et finales à partir de la méthode du RTA (Perrot, 2017).....	116
Annexe 16 : montant des charges variables et charges fixes serre dimensionnée .....	118
Annexe 17 : équipements utiles à l'installation d'un système mécanique de traitement des boues .....	120
Annexe 18 : achats nécessaires à la mise en place d'un système de lombricompostage .....	120
Annexe 19 : tableau des charges fixes pour la nouvelle serre .....	122
Annexe 20 : présentation des aléas – (d'après Benoit, 2016) .....	125

## Résumé

L'aquaponie est un système qui constitue un couplage entre aquaculture et production végétale en hydroponie avec un objectif de réduction de l'utilisation de l'eau (Somerville *et al.*, 2014) par un recyclage permanent. Depuis trois ans, dans la région des Pays de la Loire, des projets émergent à l'initiative de particuliers, d'associations et d'entreprises plutôt d'aquaculture qui cherchent à se diversifier. En 2015, une pré-étude de quatre mois conjointe SMIDAP et Lycée de O. Guichard à Guérande, OPRA1, souligne l'intérêt de lancer une étude technico économique OPRA2 avec Capacités (cellule Mer) et AREXHOR construite à partir d'un double questionnement :

Différentes approches de développement aquaponique peuvent être proposées, chacune d'entre elle relevant d'hypothèses techniques et économiques spécifiques. Dans le cadre d'OPRA, il s'agit de développer un outil piloté avec une facilité d'utilisation, un faible coût relatif d'investissement afin qu'il soit facilement transférable aux acteurs économiques. Cette approche « low tech » peut-elle être rentable ? Le cas échéant, quelles seraient les conditions techniques-économiques pour rentabiliser une activité aquaponique et permettant le maintien d'un emploi à temps plein ?

Cette approche artisanale nous amène à envisager une démarche « saisonnière », avec une production en deux temps distincts par les espèces élevées et cultivées. Les choix des espèces végétales et piscicoles constituent une base de l'étude OPRA. Les critères de marché comme les aspects techniques sont pris en compte.

Pour la conduite du pilote Hiver, le candidat déterminé est la truite arc-en-ciel. Cette espèce montre en général de bonnes performances en aquaponie. Le sandre retenu pour le pilote été s'est avéré un bon candidat.

Pour les végétaux, le choix « support hydroponique/espèce cultivée » est déterminant. Pour le scénario estival, nous avons gardé la menthe (75 % avec la variété Marocaine), le persil frisé et les fraises Mara des Bois et Charlotte sur NFT, le Basilic sur RAFT (la variété grand vert présente pour 75 % de l'ensemble), les tomates cerises, la ciboulette sur pain de coco, les tomates grappes sur billes d'argiles et le piment sur ZipGrow. Pour le cycle hiver, les poireaux ont présenté de bonnes performances sur les billes d'argile ainsi que le cresson. Différents choux sur pains de coco, le radis sur perlite et la blette sur ZipGrow sont retenus.

A partir de nos rendements et avec l'aide de certaines données bibliographiques, le dimensionnement a été calculé avec l'objectif de maximiser les surfaces des supports procurant les chiffres d'affaires les plus importants. Les supports des surfaces végétales sont dimensionnés à partir du chiffre d'affaires découlant des couples supports/espèces sélectionnés. Pour la partie végétale, le chiffre d'affaires/ espèce/ m<sup>2</sup> /mois a été déterminé. Un des enjeux en aquaponie est de trouver l'équilibre entre la surface végétale et la surface d'élevage nécessaire. Le volume de poisson en élevage a été calculé à partir d'une valeur de Rapport des Taux d'Alimentation (RTA) préalablement définie,

L'étude confirme qu'un système aquaponique « low tech » peut être rentable mais dans une approche de diversification, source de revenu économique supplémentaire pour un pisciculteur. Cette rentabilité suppose un élevage et une culture d'espèces à fortes valeurs ajoutées adaptées à ce type de conditions comme la truite pour le poisson ou la fraise pour le végétal. L'élevage piscicole avec la gestion du système recirculé est clairement le compartiment le plus sensible à maîtriser.

Source de 85% du CA, le cycle estival nécessiterait la présence d'une personne à mi-temps. Nous arriverions à un dimensionnement théorique de la serre de 265 m<sup>2</sup> comprenant 31,25 m<sup>2</sup> de surface utile d'élevage et 127 m<sup>2</sup> de surface utile de culture.

## Remerciements

Cette étude pluridisciplinaire a permis de rencontrer une grande diversité d'acteurs.

Dans un premier temps, un grand remerciement aux pisciculteurs régionaux impliqués dans ce travail, la Pommeraie Aquaculture, la Ferme Aquacole d'Anjou, Relot frères pisciculture et Gandon pisciculture.

Nous remercions également toutes les personnes qui ont participé par leur expertise à ce projet : l'équipe technique ITAVI, notamment Pierre Foucard pour ses réponses rapides et précises ; Serge Le Quillec du CTIFL pour ses précieux conseils sur l'hydroponie ; Pascal Fontaine Directeur de URAFPA. Une attention particulière à Romain Laviale pour les excellentes bases de gestion du pilote apportées lors de son stage.

Un très grand « Merci !! » à Guillaume et Vincent pour avoir participé à la gestion du pilote ainsi que les enseignants aqua et les équipes techniques du Lycée Olivier Guichard.

Nos remerciements vont également à Félix Hinckel et Alexis Louis-Sidney pour leur travail en projet tutoré du Master2 Evaluation Economique du Développement Durable de l'IEMN-IAE (Université de Nantes).

## Préambule

Depuis quelques années mais surtout depuis 2015, l'aquaponie intéresse de plus en plus de monde en France et en particulier dans les Pays de la Loire. Plus de mille visites ont eu lieu depuis cette date sur le site pilote aquaponique OPRA avec des profils variés allant du particulier amateur au porteur de projet économique. Plusieurs interventions ont été réalisées dans des écoles, auprès d'acteurs économiques ainsi qu'aux journées techniques de l'Agence Régionale pour l'Expérimentation Horticole à Pont de Cé (49) le 22 septembre 2016. Les deuxièmes journées nationales de l'aquaponie animée par l'ITAVI dans le cadre d'APIVA se sont déroulées à Guérande en juin 2016. Une conférence sur l'aquaponie organisée par l'association Bio-T-Full a eu lieu sur Nantes le 20 mars 2017. Une dizaine de projets sont actuellement en cours dans la région des Pays de la Loire. Deux d'entre eux ont fait l'objet en 2017 et en 2018 d'une demande de financement Européen et Région via le FEAMP.

Ces indicateurs révèlent une certaine dynamique régionale autour de l'aquaponie montrant ainsi l'intérêt du projet OPRA qui vise à donner des éléments technico économiques nécessaires à la création d'une unité commerciale.

## Introduction

L'augmentation de la population mondiale, la réduction des ressources et le changement climatique constituent les enjeux majeurs de demain. Ils impliquent une compétition croissante pour l'espace, l'eau, l'alimentation et l'énergie. Il faudra nourrir 2 à 3 milliards d'individus supplémentaires d'ici à 2050, sachant que 80% des terres arables sont déjà cultivées. Actuellement, 7 habitants sur 10 sont des citadins et d'ici 2030, plus de 60% de la population des pays en développement vivront dans les mégapoles (FAO, 2014 ; Baroiller JF *in* Tocqueville A. *et al*, 2015). A différentes échelles, des réflexions concernant des stratégies de développement durable sont en cours aujourd'hui. En 2010, la France définit sa stratégie pour le développement durable. L'importance d'une consommation et d'une production durable est soulignée, c'est-à-dire : « qui limite ses impacts sur l'environnement tout en améliorant notre compétitivité, notre qualité de vie ainsi que les conditions sociales de production » (Ministère de l'environnement, 2010). Dans ce contexte, les modes de production agricoles et aquacoles évoluent vers des systèmes intégrés et de nouvelles pratiques émergent avec notamment l'agroécologie, l'agriculture urbaine et d'une manière générale vers une diversification des activités agricoles et aquacoles. De nouveaux systèmes de production en aquaculture apparaissent, notamment l'aquaponie qui constitue un couplage entre aquaculture et production végétale et qui s'inscrit totalement dans ces nouvelles approches (Somerville, C *et al*, 2014).

L'aquaponie consiste à traiter et à valoriser les effluents aquacoles par des cultures végétales associées. Les composés excrétés par les poissons ou générés par la décomposition bactérienne de la matière organique via les filtres biologiques sont absorbés comme nutriments par les plantes cultivées (Mc Murtry MR, 1998; Rackocy JE, 2006). Ce système associe des poissons à d'autres cultures en hydroponie (légume, fruits, fleurs) et permet de limiter les prélèvements d'eau par un recyclage permanent. Le principe n'est pas nouveau. Les aztèques cultivaient des jardins « flottants » en milieu lacustre il y a plus de 3000 ans qui étaient irrigués par des eaux enrichies en nutriments grâce aux déjections des poissons présents dans le lac. La rizipisciculture, système intégré « riz-poisson », était développée traditionnellement dans plusieurs pays d'Asie (Foucard *et al.*, 2015). La modernisation du concept d'élevage intégré poisson/plantes sont issues de recherche de l'Université de Caroline du Nord dans les années 1980 en redécouvrant le principe que l'eau d'aquaculture pouvait constituer une source intéressante de nutriments pour des productions végétales en hydroponie (Rakocy *et al.*, 2006).

Les systèmes aquaponiques existent sous des formes très variées (Foucard P. *et al.*, 2015) :

- L'aquaponie domestique : bassin potager, aquarium potager et micro-serre familiale pour le jardin, toits d'immeubles et terrains de collectivités territoriales en agglomération, écoles...

- L'aquaponie commerciale à petite échelle : l'entrepreneur vit de sa production mais également d'activités annexes telles que la proposition de formations, les visites de sites, l'écotourisme.....

- L'aquaponie industrielle : systèmes très sophistiqués incorporant plusieurs bassins de cultures, des systèmes de filtration (mécanique et biologique), d'aération et d'alarmes, installés en milieu urbain ou péri-urbain sur des friches industrielles ou sur des sites déjà identifiés pour l'aquaculture et sur lesquels il est possible de coupler des cultures végétales ou encore sur des sites de production maraîchère sur lesquels il est possible d'installer des circuits aquacoles en recirculation.

Aujourd'hui, l'aquaponie fait l'objet d'une activité économique significative dans le monde, principalement en Amérique du nord et en Asie. Cette technologie est pour le moment surtout utilisée par des particuliers à l'échelle du jardin, tandis que la recherche dans ce domaine s'intensifie depuis plusieurs années. Il existe encore peu de systèmes commerciaux, principalement basés sur le modèle tilapia et plantes feuilles (Tocqueville *et al.*, 2016).

En Europe, la situation pourrait évoluer dans un futur proche : la résolution 2013/2100(INI) a été adoptée par le Parlement européen le 11 mars 2014 (McIntyre, 2014), les systèmes d'aquaponie recèlent un potentiel de production locale et durable de denrées alimentaires et peuvent contribuer, en combinant dans un système clos l'élevage de poissons d'eau douce et la culture de légumes, à réduire la consommation de ressources par rapport aux systèmes conventionnels. Le parlement européen a également publié un rapport classifiant l'aquaponie dans l'une des « dix technologies capables de changer le monde » (Van Woensel L. & Archer G., 2015). Un projet regroupant huit pays européens INAPRO (Innovative aquaponics for professional Application) a pour objectif d'améliorer les process autour de systèmes aquaponiques urbains et ruraux. Un programme COST (European Cooperation In Science and Technology) sur l'aquaponie a débuté en 2014 et doit prendre fin 2018.

Plusieurs projets commerciaux existent, principalement aux Pays Bas, Suisse, Allemagne et Royaume Uni.

Au niveau national, des projets aquaponiques ont commencé à voir le jour à partir de 2012 dans des régions comme la Réunion, la Nouvelle Aquitaine, les Pays de la Loire mais aussi dans des métropoles comme Paris, Lyon, Toulouse ou Nantes. Le programme APIVA, lancé en 2013 animé par l'ITAVI et financé par le CASDAR, a pour but de tester des systèmes aquaponiques sur différents types de production piscicoles (espèces d'eaux chaudes et d'eaux froides) afin de caractériser leur fonctionnement, d'analyser le couplage des compartiments aquacoles et hydroponiques et d'établir des éléments technico-économiques.

La région des Pays de la Loire est un des territoires les plus dynamiques sur cette thématique. Dès 2012, le Lycée professionnel Olivier Guichard de Guérande avait lancé l'unité EDAP : Expérimentation et Démonstration Aquaponique à vocation Pédagogique. Cette unité avait pour but de montrer la possibilité de traiter et de valoriser des effluents piscicoles par les cultures associées avec un objectif principalement pédagogique. Fin 2014, le SMIDAP s'est rapproché du Lycée de Guérande afin de travailler sur des aspects technico économiques pour répondre aux sollicitations de plus en plus nombreuses sur le sujet. C'est dans ce cadre que depuis 2015, le SMIDAP et le lycée Professionnel se consacrent conjointement à l'étude d'un pilote aquaponique régional créant le projet OPRA (Optimisation d'un Pilote Régional d'Aquaponie). Une petite étude de quatre mois a été lancée en 2015 montrant l'intérêt de poursuivre la démarche vers un modèle « low tec » et en identifiant la nécessité de conduire la production en deux cycles annuels ; un cycle estival et un cycle hivernal (Laviale, 2015).

En 2016, une étude technico économique est mise en place associant le Laboratoire d'Economie et de Management de Nantes et l'Agence Régionale pour l'Expérimentation Horticole. L'objectif est double. Il s'agit d'une part de vérifier si une unité aquaponique artisanale peut être rentable et d'autre part si tel est le cas, de dimensionner une serre aquaponique permettant de générer un chiffre d'affaires (CA) suffisant pour couvrir le coût d'un emploi et toutes les charges générées par ce projet.

La problématique d'OPRA2 s'articule donc autour de plusieurs questions :

- Quelles sont les conditions requises pour une production aquaponique conduite sur deux cycles annuels ?
- La complémentarité des deux cycles saisonniers permet-elle une rentabilité économique ?

Dans le but de répondre à ces questions, plusieurs problématiques intermédiaires ont été abordées :

- Quelles sont les espèces piscicoles et végétales d'intérêt économique susceptibles de s'adapter aux contraintes du pilote aquaponique ? Et quelles sont leurs performances de production dans un tel système ?
- A partir de ce pilote expérimental, quel serait le dimensionnement économiquement rentable d'un outil de production ?

Pour répondre à ces questions, une expérimentation est menée sur notre pilote de production (gestion et suivi de la production estivale et hivernale) ainsi qu'une veille bibliographique. L'analyse économique sera réalisée dans un second temps.

L'étude OPRA comporte plusieurs volets. Le premier concerne l'optimisation technique du pilote, notamment sur le traitement de l'eau, sur le circuit hydraulique, sur les variations thermiques dans la serre et sur les supports hydroponiques. Le deuxième grand volet concerne les productions animales et végétales avec le choix des espèces, le couple espèce végétale support et la lutte biologique. Des analyses bactériologiques sont aussi réalisées sur les végétaux. L'analyse économique constitue le dernier volet de l'étude associant les données mesurées dans le pilote et celles issues de la bibliographie. Il s'agit d'étudier les conditions de rentabilité au regard des options technico-économiques retenues sur les deux cycles de production (espèces végétales et animales sélectionnées, matériels utilisés, types d'aliments et nutriments, etc.) et des types de débouchés commerciaux envisagés. L'analyse des différents paramètres retenus met en évidence leur incidence sur la formation des coûts et des recettes. Une étude plus approfondie des différents marchés des intrants et des produits finaux obtenus au cours des deux cycles vient conforter l'analyse.

# 1. Etat des lieux des connaissances sur l'aquaponie et contexte régional

## 1.1. Principe de l'aquaponie

Un système aquaponique est une unité d'aquaculture en circuit fermé couplée à une production de plantes en hydroponie (Somerville *et al.*, 2014). Les rejets dissous issus des organismes aquacoles peuvent être des sources de nutriments assimilables par les racines de végétaux après une étape préalable d'élimination des matières particulaires par une filtration mécanique puis par une étape de dégradation microbienne des composés ammoniacaux avec l'aide des bactéries nitrifiantes de dégradation microbienne des composés ammoniacaux par des bactéries nitrifiantes par filtration biologique. Ces systèmes doivent permettre un recyclage de l'eau supérieur à 90% rendant minime l'impact sur la ressource en eau extérieure tout en permettant une qualité de l'eau recirculée parfaitement saine pour les trois compartiments du système aquaponique (figure 1).

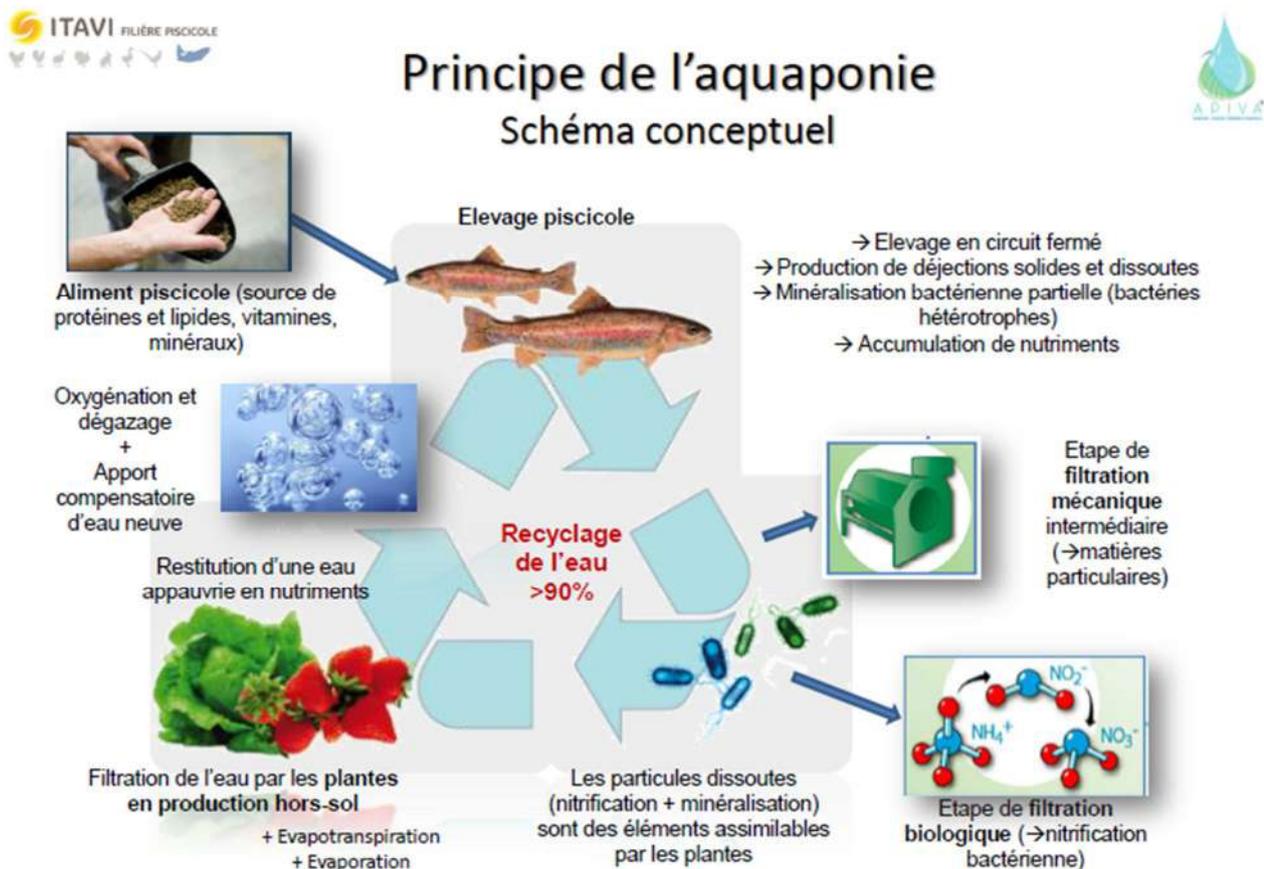


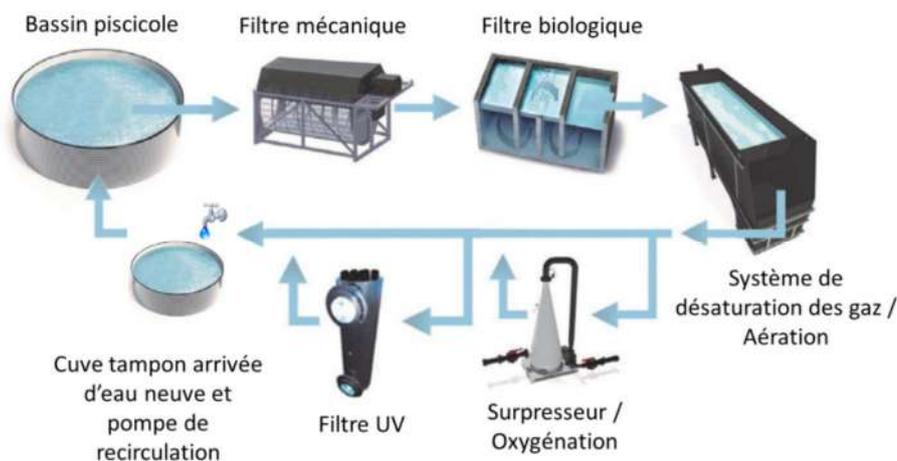
Figure 1 : principe de l'aquaponie (Tocqueville A. *et al.*, 2016)

Il paraît important pour l'étude de réaliser une présentation succincte de ces deux unités de production aquacole et hydroponique.

### 1.1.1. Système d'aquaculture en eau recirculée ou système RAS

Le système d'aquaculture en circuit recirculé (Recirculating Aquaculture System : RAS) a pour principe la réutilisation de l'eau d'une production aquacole par le biais d'une technologie permettant sa filtration (Bregnballe J., 2010). Les technologies de RAS deviennent de plus en plus courantes en France et à l'étranger depuis une trentaine d'années. Les différents stades d'élevage peuvent être concernés, de l'écloserie au grossissement, en eau de mer ou en eau douce. Par principe, les RAS peuvent être utilisés pour tout type d'espèce aquatique et toute intensité d'élevage, mais il est plus courant de les rencontrer en élevage intensif de poissons (Timmons & Ebeling, 2007).

Le degré de recirculation du système se calcule généralement via le pourcentage d'eau neuve intégrée au système ( $m^3$  d'eau neuve / volume total du circuit). L'objectif étant de réduire la consommation d'eau quotidienne, le circuit doit être le plus fermé possible. Afin que l'eau soit réutilisable, il est nécessaire de la « traiter » de façon à réduire les déchets solides et dissous et d'apporter de l'oxygène pour obtenir la qualité nécessaire à la croissance des organismes.



Ainsi le RAS est considéré comme un système d'élevage hors sol (souvent piscicole) comprenant des filtrations mécanique et biologique et n'utilisant qu'un faible apport d'eau neuve. La figure 2 représente un système RAS simple sur lequel peuvent se rajouter des éléments techniques comme un procédé stérilisateur (type UV) et un système de désaturation des gaz afin d'augmenter la qualité de l'eau (Lavenant *et al.* 1995 ; Bregnballe J., 2010).

Figure 2 : conception classique d'un système RAS, les filtres à UV et surpresseurs sont fonction du degré de qualité d'eau souhaité (D'après Bregnballe, 2010)

Ces systèmes utilisent 90% d'eau en moins que les autres systèmes de production aquacole tout en contrôlant la qualité du milieu d'élevage. Ils permettent de pratiquer l'aquaculture dans des sites où la qualité d'eau est limitée (Roque, 2008 ; Timmons & Ebeling, 2007). Par rapport à un système conventionnel, ils permettent de stabiliser et de contrôler plus facilement les paramètres de l'eau d'élevage, tout en limitant le taux de renouvellement de l'eau dans le système, en général entre 5% et 10% du volume d'élevage par jour (Ifremer, 2009 ; Tocqueville *et al.*, 2016). Plus le système de traitement de l'eau sera performant plus le degré d'ouverture du système sera faible. Dans un circuit totalement ouvert, il faut environ  $100 m^3$  de renouvellement d'eau par kg d'aliment distribué. Un système en circuit fermé performant permet de limiter l'ajout d'eau neuve à moins de  $1 m^3$  par kg d'aliment (figure 3).

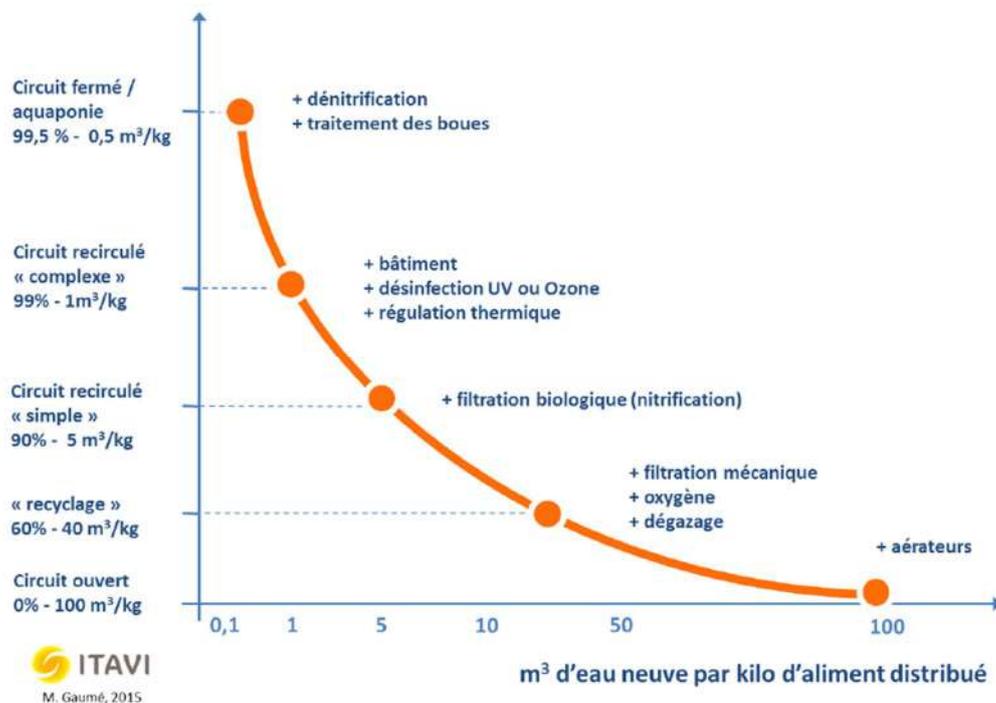


Figure 3 : intensité de recirculation des systèmes d'élevage piscicole (Gaumé M. in Tocqueville *et al.*, 2016)

Cette technologie reste cependant relativement peu employée par rapport aux modèles classiques (Labbé L. *et al.*, 2014). La lourdeur des investissements, des coûts de fonctionnement et la gestion des effluents constituent les principaux freins au développement des systèmes RAS (Foucard P. *et al.*, 2015). Le tableau 1 reprend les avantages et inconvénients de ce type de systèmes.

Tableau 1 : avantages et inconvénients de l'aquaculture en circuit fermé par rapport à l'aquaculture en circuit ouvert (Benoit, 2016)

Avantages	Inconvénients
- Economie d'eau	- Maîtrise délicate
- Economie d'espace	- Assurer une utilisation optimale des intrants (eau, oxygène, aliment, traitements)
- Utilisation d'une eau initiale de qualité variable (grâce à un traitement performant)	- Effectuer un contrôle continu des paramètres de l'eau
- Gestion des paramètres physico-chimique	- Qualification du personnel
- Respects des normes de rejets	- Présence et/ou système d'alarme
- Pilotage des élevages hors des variations environnementales	- Consommation énergétique
- Gestion des pathogènes si les bacs d'élevage sont isolés	- Contrôle des MES particulaires délicat
	- Valorisation des déchets solides
	- Investissements importants

### 1.1.2. Culture végétale hors-sol

La culture végétale en hors sol consiste en une production végétale réalisée sur substrat neutre alimentée par une solution nutritive. L'hydroponie permet la culture de plante sur substrat retenant la solution nutritive ou directement dans un bain de solution (figure 4). Il existe une variante, appelée aéroponie, qui consiste à pulvériser la solution par jets directement sur les racines (Sardare & Admane, 2013 ; Somerville *et al.*, 2014).

Les cultures hors sol présentent généralement des performances de rendement supérieures aux cultures classiques. En effet, les plantes disposent théoriquement de leur besoin par les apports de la solution et ne subissent pas les attaques des pathogènes présents habituellement dans le sol. De plus, les solutions nutritives peuvent être adaptées à chaque stade de développement de la plante pour encore accroître les performances.

Un système de culture hydroponique basique consiste donc en un réservoir de solution nutritive, une zone de culture sur substrat neutre alimenté en solution par une pompe et un apport en air, nécessaire pour le captage des nutriments par les racines (figure 4)(Somerville *et al.*, 2014). La solution est apportée de manière intermittente suivant différents systèmes d'irrigation (sub irrigation, goutteur, gouttière...).

La culture végétale en hors sol présentent des caractéristiques spécifiques. Le tableau 2 reprend les avantages et inconvénients de ce mode de culture. L'augmentation des performances de culture entraîne un véritable essor de cette technique, depuis les années 60-70, partout dans le monde (Sardare & Admane, 2013). Cette technique, permettant une économie d'eau et d'espace par rapport à l'agriculture classique, est développée y compris en zone aride ou dans des zones urbaines (Somerville *et al.*, 2014). Il existe une diversité de supports possibles pour l'hydroponie permettant une adaptation aux différents contextes (agriculture urbaine, toits végétaux...).

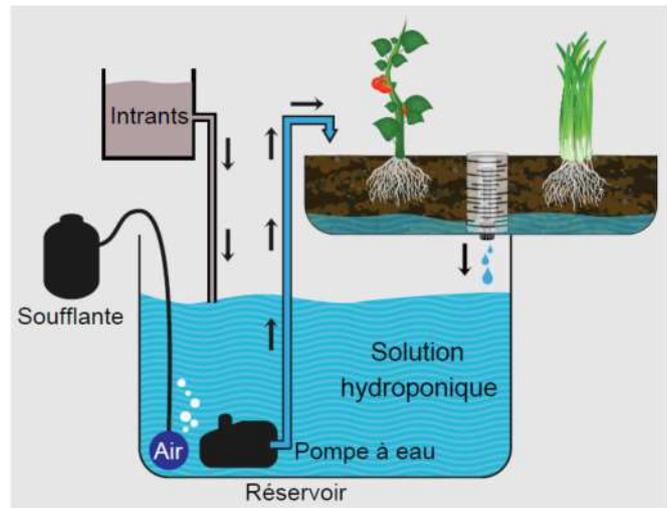


Figure 4 : schéma de principe d'une culture hydroponique (Somerville *et al.*, 2014)

Les substrats régulièrement utilisés sont : la fibre de coco, la laine de roche, la bille d'argile, la perlite, la vermiculite, la pouzzolane ou encore la sphaigne.

Les systèmes hydroponiques permettent de réaliser de 75% à 90% d'économie d'eau par rapport à un arrosage traditionnel par aspersion. De plus, cette activité élimine les problèmes liés au sol (pathogènes, structure du sol..) et permet de cultiver des végétaux sur des terres non arables notamment en zones urbaine ou péri urbaine (Martinez & Morard, 2000). Par ailleurs, les cultures hydroponiques intensives peuvent atteindre une optimisation de rendement de 20 à 25% par rapport aux cultures sur sol (FAO, 2014b).

La principale limite de ces systèmes hydroponiques vient des rejets de solutions nutritives souvent utilisées en excès (tableau 2) et de la trop grande dépendances de ces cultures aux énergies fossiles via l'utilisation de plastiques ou d'engrais chimiques (Martinez & Morard, 2000).

Tableau 2 : avantages et inconvénients des cultures hydroponiques par rapport à une culture sur terre (Benoit, 2016)

Avantages	Inconvénients
- Economie d'espace	- Installations couteuses
- Culture indépendante des qualités du sol	- Nécessité de contrôler les installations
- Economie d'eau	- Qualification du personnel
- Rendements supérieurs	- Rigueur et qualité des jeunes plants
- Réduction des risques de pathogènes telluriques	- Certaines variétés sont inadaptées
- Diversité des supports possibles	- Devenir des substrats de culture non biodégradables
- Possibilité de cultures verticales	- Pas de certification Agriculture Biologique possible (sauf pour les productions de jeunes plants)
- Optimisation des intrants	- Apports d'engrais importants
- Réduction de la main d'œuvre (pas d'entretien du sol)	- Pertes d'eau par évaporation importantes
- Contrôle de la croissance, prévision des récoltes	

### 1.1.3. L'aquaponie, association d'une production aquacole et végétale

L'aquaponie peut se définir comme un couplage entre l'aquaculture et la culture végétale hors-sol, le tout en circuit dit fermé et en eau recirculée (Foucard *et al.*, 2015).

Les systèmes d'aquaculture en système recirculé (RAS) classiques nécessitent une gestion des déchets. Afin que l'eau soit réutilisable, les déchets toxiques sont éliminés tandis que les éléments nutritifs non toxiques et la matière organique s'accumulent et constituent des sous-produits métaboliques. Les systèmes qui produisent des cultures supplémentaires utilisant les sous-produits de la production des espèces principales sont appelés systèmes intégrés (Crespi & Coche, 2008). Si les cultures secondaires sont des plantes, aquatiques ou terrestres, cultivées en association avec des poissons élevés dans un système RAS, ce système intégré est appelé système aquaponique (Somerville *et al.*, 2014). La partie aquacole ne concerne pas forcément uniquement les poissons mais potentiellement d'autres organismes animaux aquatiques comme les crustacés par exemple.

En hydroponie classique, les besoins des plantes sont satisfaits par des apports en solution nutritive. En aquaponie, la solution nutritive est composée des sous-produits métaboliques provenant de la digestion de l'aliment distribué aux poissons. Les bactéries présentes dans le système vont réaliser une décomposition microbienne des déchets afin de rendre les nutriments bio-disponibles pour la production végétale (figure 6). Les apports sont ainsi consommés de façon optimale par l'ensemble des compartiments du système.

Cependant, les plantes ont la plupart du temps un optimum de croissance lorsque l'eau d'irrigation a un pH compris entre 5,8 et 6,5 (Hochmuth, 2012)(figure 5). Alors que gamme de pH pour un élevage piscicole se situe entre 6,5 et 8,5, celle permettant un fonctionnement optimum du filtre biologique et les bactéries nitrifiantes est plutôt entre 7,5 et 9. Le compromis le plus adapté permettant de concilier les deux préférés serait un pH compris entre 6,5 et 7,5 (Rakocy, *et al.*, 2006 ; Foucard *et al.*, 2015)

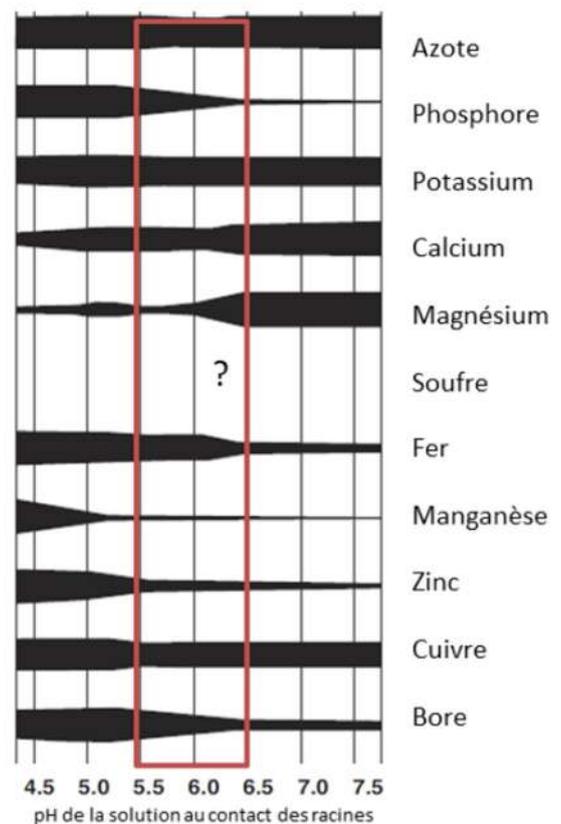


Figure 5 : Diagramme représentant la biodisponibilité des nutriments pour les racines en culture hydroponique selon le pH de la solution nutritive (Jones, 2005)

Si les changements d'eau sont restreints, il est possible que les nutriments dissous s'accumulent à des concentrations similaires à celles de solutions nutritives hydroponiques comme c'est essentiellement le cas de l'azote. Les poissons produisent des déchets azotés, sous forme d'urée ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) excrétée par le rein et sous forme d'ammoniaque ( $\text{NH}_3$ ), directement dans l'eau à travers leurs branchies (Blancheton *et al.*, 2004), puis les bactéries interviennent pour la nitrification (figure 6). Les paramètres optimaux pour une nitrification bactérienne varient entre 30 et 38°C pour la température et de 7,5 à 8,2 pour le pH (Foucard *et al.*, 2015). La performance du filtre biologique va dépendre des caractéristiques des supports bactériens et notamment la surface d'accueil mesurée en  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . La Nitrification bactérienne va transformer l'azote ammoniacal issu des rejets des poissons en nitrite puis en nitrate (figure 6). L'ammoniaque et les nitrites peuvent être toxiques pour les poissons, tandis que les nitrates sont la forme azotée privilégiée pour la culture de plantes supérieures telles que les légumes et les fruits. Ainsi, c'est cette forme que l'on souhaite concentrer dans le système de production. La mise en place d'un filtre biologique dure 40 jours.

En aquaponie, les renouvellements d'eau se situent donc entre 2 et 10% du volume d'eau total afin de compenser l'eau perdue par la transpiration foliaire, les purges, les lavages du système et l'évaporation (Foucard *et al.*, 2015), tout en permettant la concentration des nitrates. Les concentrations visées sont en annexe 2.

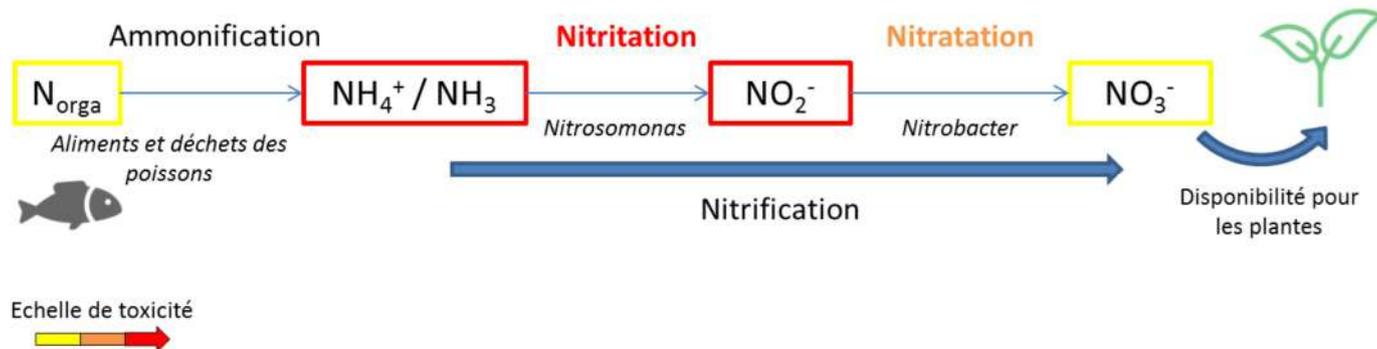


Figure 6 : cycle de l'azote tel qu'il a lieu en aquaponie. Les populations bactériennes Nitrosomonas et Nitrobacter sont fonction de l'oxygène dissous et des valeurs de pH de l'eau (d'après Laguerre, 2013).

Les supports du plus au moins courants sont : la culture sur substrat inerte, la culture sur radeaux flottants, la culture sur colonnes verticales et la culture par méthode « Nutrient Film Technique » (NFT). Les différents systèmes sont développés dans l'Annexe 3, sous forme de fiches techniques reprenant les caractéristiques, avantages et inconvénients de chacun (Laviale, 2015 ; Foucard et al., 2015).

Les avantages de l'aquaponie sont nombreux. Ce système permet d'assainir l'eau via la phytoépuration qui est ensuite réutilisée dans le compartiment aquacole avec un taux de renouvellement en eau en théorie encore plus faible qu'en aquaculture recirculée (Rackocy et al., 2006).

Les techniques hors sol ont un rendement supérieur à la culture classique avec une productivité pouvant au moins doubler dans certains cas (Savidov & Rakocy, 2007 ; Rackocy et al., 2006 ; Nozzi et al., 2018). Certaines études montrent qu'il n'y a pas de différences de rendements entre l'hydroponie et l'aquaponie (Pantanella et al., 2015). D'autres montrent le contraire lorsque tous les paramètres sont maîtrisés, notamment au niveau du filtre biologique (Pantanella et al., 2015).

L'aquaponie est aussi intéressante en termes d'optimisation de certains coûts de production sur les infrastructures et sur l'utilisation de l'espace. Elle pourrait même permettre la production de végétaux frais et de poissons en milieu urbain, périurbain ou encore dans des régions où le sol est pauvre (Foucard et al., 2015).

## 1.2. Contexte économique de l'aquaponie

### 1.2.1. Etat des lieux des connaissances économiques liées à l'aquaponie

#### 1.2.1.1. Rentabilité des systèmes d'aquaponie

Différentes études soulignent (Rackocy et al., 2006 ; Engle, 2015 ; English, 2015) que l'aquaponie paraît a priori plus rentable qu'un système de production en aquaculture RAS classique ou en hydroponie classique. En effet, les coûts d'infrastructures, d'énergie et d'intrants sont répartis sur les deux productions (Blidariu & Grozea, 2011). Toutefois, ces deux installations demandent respectivement des investissements conséquents. A travers la bibliographie et les échanges avec des porteurs de projet régionaux, sont retenus trois points essentiels influençant la rentabilité économique d'un système d'aquaponie, points qui seront détaillés au cours de l'étude OPRA :

- les coûts d'investissements liés à l'installation,
- les coûts d'exploitation (charges courantes liées à l'activité aquaponique),
- le marché ciblé et les coûts de mise en marché qui en découlent.

En fonction du dimensionnement souhaité du projet, il est plus aisé de déterminer les investissements nécessaires alors que les coûts d'exploitation sont plus délicats à évaluer compte tenu du peu d'informations disponibles à mettre en lien avec l'émergence récente de cette activité. Une première approche bibliographique permet de recueillir des informations préalables à notre évaluation.

Selon une synthèse des études économiques, l'aquaponie disposerait d'un potentiel économique satisfaisant. La rentabilité issue des systèmes provient essentiellement des productions végétales valorisées sur des marchés de niche tandis que la production piscicole s'avérerait peu rentable (Engle, 2015). Cette auteure met en garde les investisseurs sur la prise en compte des risques associés à la complexité de maîtrise du système. Les risques de pertes liées à des parasites ou maladies compte tenu du peu de traitements possibles en aquaponie sont aussi à prendre en compte dans la difficulté de rentabilité des systèmes. Toutefois, cette synthèse ne se repose que sur sept études différentes. De plus, les cultures piscicoles ne concernent que le tilapia, qui est un poisson à faible valeur ajoutée mais à forte productivité. Les espèces végétales citées sont essentiellement le basilic et la salade. English (2015) propose également une analyse de faisabilité économique sur un pilote produisant des salades et basilic associés à du tilapia à grande échelle. L'auteure en conclut une rentabilité positive. Toutefois, là encore, certains coûts ne sont pas pris en compte tels que celui du terrain d'installation, les coûts de commercialisation et ceux liés à la partie non commercialisable des productions végétales. Or ces charges sont considérées comme particulièrement conséquentes par Engle (2015).

Les coûts de commercialisation et la main d'œuvre associée lors de la récolte, de l'emballage et du démarchage des clients, représentent des charges importantes peu souvent analysées dans les études. A noter que les coûts de commercialisation dépendent fortement des circuits de distribution cibles. Ceci souligne l'importance des potentialités de valorisation et de marché qui sont à prendre en compte. Une étude réalisée aux Etats-Unis montre qu'un circuit de distribution très court pouvait être moins rentable que les ventes en marché de gros mais que les circuits de vente en Organisation de Producteurs pouvaient s'avérer plus rentables encore (Hardesty & Leff, 2010). En effet, pour une petite structure, les coûts dédiés à la commercialisation (démarchage, emballage en petits volumes...) peuvent se révéler plus importants en circuit court que lors de vente à un grossiste. Il sera donc nécessaire d'intégrer ces différents facteurs dans nos hypothèses économiques. Dans les potentialités de marché, (Love *et al.*, 2015) ont montré qu'une façon de rentabiliser une activité aquaponique autre que par la production était de diversifier les activités par une offre de vente de matériels ou des prestations services en lien avec cette activité. Dans les Pays de la Loire, trois entreprises aquacoles ont opté pour cette diversification. Au niveau international, sur les deux cent cinquante-sept personnes interrogées par Love *et al.* (2015), quatre-vingt-sept génèrent une activité commerciale par les prestations de service, quatre-vingt-treize par les prestations et la vente de la production (poissons et plantes) et quatre-vingt-douze seulement par la production de plantes et/ou poissons. Ils soulignent aussi que ceux qui choisissent la commercialisation du duo « services et production » atteignent une rentabilité plus rapidement que les producteurs exclusifs ou les prestataires exclusifs. Cela témoigne de l'intérêt d'une diversification des activités au sein d'une entreprise d'aquaponie pour améliorer la rentabilité.

### 1.2.1.2. Pilotes développés en France

Les modèles productifs professionnels sont peu nombreux pour l'instant en France. Toutefois, les 2<sup>ndes</sup> et 3<sup>ème</sup> Journées Nationales de l'Aquaponie, qui se sont tenus respectivement en juin 2016 à Guérande et en décembre 2018 à Paris, ont souligné l'intérêt porté par un grand nombre d'acteurs. Lors du colloque de 2016, parmi les systèmes en production, de nombreux particuliers rencontrés avaient des petits pilotes de production et que les projets pouvaient s'orienter vers des systèmes aux dimensionnements et à la rentabilité diversifiés (lucratif ou non, individuel ou collectif). Le peu de connaissances actuelles sur l'aquaponie entraîne une volonté de partage des savoirs et la création d'une association de producteurs pour soutenir cette nouvelle filière. En France, des études technico-économiques sont actuellement en cours mais n'ont pas encore été publiées. Dans ce cadre, le projet APIVA développe trois pilotes permettant un soutien technique et une analyse scientifique en vue d'une évaluation financière (Tocqueville *et al.*, 2016)

Depuis 2016, les premières créations d'unités à vocation commerciale ont vu le jour comme *Aquaponie Développement* en Nouvelle Aquitaine, la *Ferme Aquaponique de l'Abbaye* en Normandie et dans les Pays de la Loire la *Ferme Aquacole d'Anjou* ou encore la *Pommerie Aquaculture* qui est une des premières entreprises françaises (avec *Aquaponie Développement*) à bénéficier d'une aide FEAMP pour un projet privé d'aquaponie.

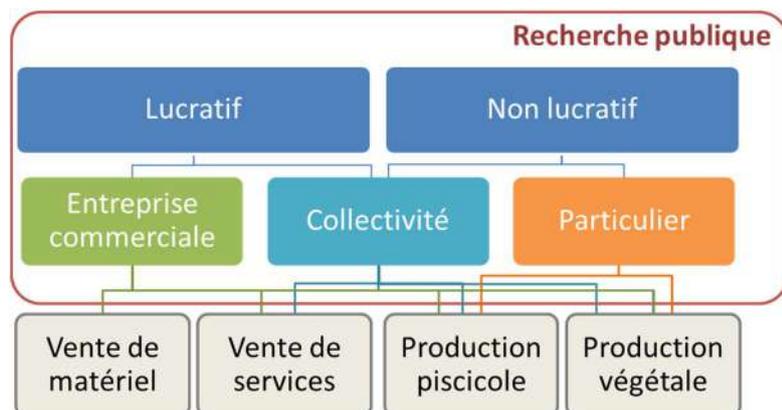


Figure 7 : les différentes approches économiques de l'aquaponie et leurs voies de valorisation (Benoit, 2016)

Il existe différentes approches de développement pouvant être choisies comme condition dans nos hypothèses économiques (figure 7). Il en résulte une diversité de projets comme en témoignent les exemples régionaux décrits ci-après.

### 1.2.2. Contexte économique en Pays de la Loire

Afin d'évaluer l'intérêt et les performances économiques de l'aquaponie dans notre contexte régional, il paraît nécessaire de s'interroger sur le contexte actuel de chacune des productions concernées. Notre analyse est réalisée sur un pilote expérimental et pédagogique, entraînant des choix d'itinéraires techniques (réplicas, diversité...) spécifiques ne s'appliquant pas à une entreprise privée. Les informations bibliographiques sont donc importantes pour mettre nos résultats en perspective.

#### 1.2.2.1. Contexte de l'aquaculture en Pays de la Loire

En 2015, le secteur aquacole français comptait 10 520 emplois en équivalent temps pleins (ETP). Ce qui correspond à 167 milliers de tonnes et 632 millions d'euros, avec une filière essentiellement portée par la conchyliculture (FranceAgriMer, 2018). En 2015, la filière piscicole quant à elle, représentait 43 000 tonnes, avec 70% de la truite, et plaçait la France au 5<sup>ème</sup> niveau européen (FranceAgriMer, 2018 ; FEAP, 2015).

En Pays de La Loire, la filière aquacole est aussi portée par la production conchylicole qui se répartie entre l'ostréiculture, la mytiliculture, la vénériculture et la cérestoculture, chiffrant un total de 89 millions d'euros de chiffre d'affaires (DRAAF, 2015). La filière régionale de pisciculture d'eau douce représente quant à elle, un chiffre d'affaires de 3.2 millions d'euros pour au moins 400 tonnes de production annuelle avec une vingtaine de producteurs professionnels (Trintignac *et al*, 2016). La production d'eau douce ligérienne est moins importante que celle d'autres régions et concerne principalement la pisciculture en étangs. Des études sont en cours sur les potentialités de développement de systèmes RAS dans les Pays de la Loire, notamment en récupérant de l'énergie fatale.

En Europe et en France, une aquaculture « durable » et de proximité semble ouvrir de nouvelles perspectives de marché avec la potentialité d'un label certifiant le « biologique ». L'intérêt concernant la production biologique en aquaculture est croissant malgré de nombreuses contraintes. Une baisse de la productivité, une augmentation des coûts (notamment pour la certification) et le manque de régulation des « labels »/ marques développés par des entreprises privées (EIFAC. European Inland Fisheries Advisory, 2001) sont constatés. Cette voie d'aquaculture « durable » nous encourage donc dans la perspective d'un intérêt économique de l'aquaponie avec un label défini.

Il existe trois types de marchés pour la production de poisson d'eau douce issu d'aquaculture : la consommation humaine, le repeuplement et la pêche de loisirs et enfin l'ornement (Fiot *et al*, 2011). La production pour l'alimentation est prédominante en Europe (EIFAC. European Inland Fisheries Advisory, 2001). Dans les Pays de la Loire, la production est essentiellement destinée à la pêche et au repeuplement mais des projets de diversification vers les autres marchés se développent depuis quelques années et récemment vers l'alimentation humaine (Fiot *et al*, 2011 ; Ameslon *et al*, 2012 ; Trintignac *et al*, 2016).

### 1.2.2.2. Contexte des cultures hors sol et des cultures végétales en Pays de La Loire

La région Pays de la Loire représente 6% de la superficie du territoire français et se distingue pour les productions végétales légumières françaises, comme en témoigne la présence de nombreuses structures de conseil en horticulture et maraichage (DRAAF, 2016). En 2010, avec 5 % et 14% de la superficie nationale en légumes frais et horticole, elle concentre environ 1 800 exploitations pratiquant ce type de culture. Malgré un nombre d'entreprises en diminution, la surface a augmenté. Le département de Loire Atlantique concentre la moitié de la surface agricole utile (SAU) légumes frais de la région et celui du Maine et Loire plus de 50% de la surface horticole. On observe un développement de la culture sous serres bien que la très grande majorité de la SAU soit exploitée en plein air ou sous abri bas. En termes d'emplois, une exploitation cultivant des légumes frais utilise en moyenne 4,8 Unités de Travail Humain (UTH) et une exploitation horticole 8,6. Deux exploitants sur cinq commercialisent toute ou partie de leur production via des circuits courts (Agreste, 2012). En termes de diversité de production, on constate une gamme étendue de types de productions. Le tableau 3 reprend les principaux chiffres de production pour des légumes d'intérêt en Pays de la Loire. Une surface non négligeable est consacrée aux productions de plantes à parfums, aromatiques et médicinales, essentiellement en Vendée et en Maine et Loire avec environ 1 200 ha (Agreste, Pays de la Loire, 2015).

Tableau 3 : production légumière en tonnage et en surface en Pays de la Loire et en France (Agreste, 2015)

	Pays de la Loire		France	
	Surface agricole (ha)	Production (tonnes)	Surface agricole (ha)	Production (tonnes)
Laitues	802	14 980	8 802	236 299
Autres salades	217	1 649	3 309	46 541
Concombres	99	23 952	551	121 587
Tomates	215	95 528	4 795	761 693
Plantes à parfums, aromatiques et médicinales	1 567	NA	38 011	NA

L'intérêt régional pour une production maraîchère en aquaponie est donc envisageable compte tenu des nombreuses compétences présentes et de l'existence d'un marché pour la production en hydroponie.

### 1.2.2.3. L'aquaponie en Pays de la Loire en 2016-2018

Pour conclure cette approche contextuelle, nous souhaitons l'illustrer par différents modèles ligériens afin de saisir les démarches diversifiées qui s'animent au niveau régional. Les porteurs rencontrés sont plutôt des aquaculteurs en voie de diversification ou des particuliers et des associations qui s'inscrivent dans une démarche d'économie circulaire et d'agriculture urbaine.

Les premiers projets économiques datent de 2013-2014 en Loire Atlantique et dans le Maine et Loire. Jusqu'en 2017, les démarches professionnelles consistaient essentiellement à du conseil et à de la production et vente de petits systèmes autonomes aquaponiques. Depuis, de nouvelles initiatives axées vers des systèmes productifs pour l'alimentation humaine apparaissent. Une première unité commerciale a fait l'objet d'un financement FEAMP en 2017 dans la Sarthe. Une autre unité plus importante a démarré en Loire Atlantique en 2017 et a fait aussi une demande de financement FEAMP en 2018. Un troisième projet s'est concrétisé en Mayenne durant l'été 2018. Un dernier se monte actuellement dans le Maine et Loire. D'autres projets sont en réflexions actuellement.

### 1.3. Bilan de la veille bibliographique – matrice SWOT

L'aquaponie se situe dans les attentes sociétales actuelles (locavore, agriculture urbaine, permaculture, agriculture raisonnée, durabilité et autonomie des productions...) tout en étant basée sur un procédé de culture ancestrale qu'est la co-culture végétale et animale. Il semblerait donc que cette pratique, nouvelle en France mais en développement dans le monde depuis plusieurs années, dispose d'une forte opportunité d'expansion en prenant garde toutefois à un éventuel effet de mode qui s'essoufferait. Le tableau 4 résume les conclusions apportées par la veille bibliographique et permet de dresser les grandes lignes qui caractérisent le devenir de cette filière. Cette matrice servira à la mise en perspective du scénario économique de l'étude OPRA.

Tableau 4 : matrice SWOT pour un bilan du procédé et de la filière d'aquaponie (Benoit, 2016 d'après Foucard *et al.*, 2015)

<p style="text-align: center;"><b>Forces</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Optimisation de l'utilisation des aliments : jusqu'aux sous-produits</li><li>- Coproduction végétale et animale</li><li>- Economie d'eau</li><li>- Economie d'espace</li><li>- Absence de traitements (intéressant pour le consommateur)</li><li>- Attraction intellectuelle et pédagogique</li></ul>	<p style="text-align: center;"><b>Faiblesses</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Complexité technique : nécessite la double compétence aquacole et horticole</li><li>- Absence de modèles de dimensionnement fiables</li><li>- Equilibres à maintenir</li><li>- Nécessite de forts investissements initiaux</li><li>- Hydroponie donc pas de label biologique</li></ul>
<p style="text-align: center;"><b>Opportunités</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Des économies d'intrants par rapport à l'hydroponie, un apport régulier via les aliments pourrait permettre des meilleurs rendements de production végétale</li><li>- Possibilités de développement en agriculture urbaines</li><li>- Améliore l'image de l'aquaculture (traitements des effluents)</li><li>- Filière dynamisée par l'esprit « locavore »</li><li>- Une rentabilité aussi permise par la vente de services et matériels</li><li>- Contexte sociétal favorable aux systèmes de production innovant, sans rejet, autonome...</li></ul>	<p style="text-align: center;"><b>Menaces</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Peu de données économiques : investisseurs prudents</li><li>- Concurrence avec les autres modes de production</li><li>- Effet de mode ?</li><li>- Incertitudes réglementaires</li></ul>

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Démarche : OPRA 2 dans la continuité d'OPRA1

Le lycée O. Guichard de Guérande s'est inscrit dans la démarche « enseigner à produire autrement » proposée par le Ministère de l'agriculture. Depuis 2012, le lycée a créé l'unité EDAP à l'aide d'un co-financement de la Région via le SMIDAP. Les enseignants et élèves de la filière piscicole ont mis en place une serre de production aquaponique qui constitue le pilote régional de la région Pays de Loire.

Depuis 2015, le SMIDAP s'est associé avec le lycée pour améliorer l'unité EDAP avec la mise en place d'un projet régional, OPRA, qui se déroule en deux temps : OPRA1 pour une découverte et OPRA2 pour un approfondissement des connaissances. En 2016, afin de compléter les compétences autour de cette étude, un groupe de travail a été mis en place réunissant le SMIDAP, le Lycée O. Guichard et deux autres partenaires : l'AREXHOR PL pour le volet végétal et la cellule MER de Capacités pour la compétence économique. D'autres experts sont intervenus dans ce groupe de travail de façon ponctuelle ou régulière (le CTIFL, l'ITAVI et des porteurs de projets régionaux). Ces collaborations pluridisciplinaires permettent d'analyser les pendants techniques et économiques du pilote aquaponique régional afin de l'optimiser et d'apporter des éléments pour les professionnels intéressés.

Ainsi le premier objectif d'OPRA est de développer un outil piloté avec une facilité d'utilisation, un faible coût relatif en investissement (absence de matériel de chauffage et de mécanismes de ventilation dans la serre) afin qu'il soit facilement transférable aux professionnels. L'étude OPRA1 a été réalisée en 2015, pendant une durée de 4 mois et n'associait que le Lycée de Guérande et le SMIDAP. Elle avait pour objectif une exploration de l'aquaponie, l'optimisation technique du pilote et une première approche de la rentabilité économique du système. Le choix des productions piscicoles s'était orienté vers deux espèces. La première, les poissons rouges (*Carassius auratus*), a été choisie pour un aspect de facilité de pilotage, et la seconde, les amours blancs (*Ctenopharyngodon idella*), pour une démarche de valorisation (Laviale, 2015). Afin de faciliter le pilotage et de comparer les performances des supports, la culture végétale était restreinte essentiellement à une espèce, le basilic (*Ocimum basilicum*). A l'issue de l'étude OPRA1, les objectifs d'optimisation du pilote ont été majoritairement atteints avec l'amélioration du fonctionnement de la structure. Un suivi complet de l'ensemble de l'installation a été effectué et des indices zootechniques et phytotechniques ont permis de collecter des informations sur les performances du système. La première approche économique a permis de conclure que le cycle estival tel qu'il était conduit entraîne une situation économique déficitaire mais avec des perspectives intéressantes. Il a donc été décidé de poursuivre l'étude OPRA afin d'évaluer une production annuelle (Laviale, 2015).

OPRA2 a donc la particularité d'envisager une production en aquaponie en deux temps (saison chaude / saison froide), comprenant deux cycles au cours de l'année. L'étude OPRA2 s'écoulera donc pendant 16 mois (figure 8).

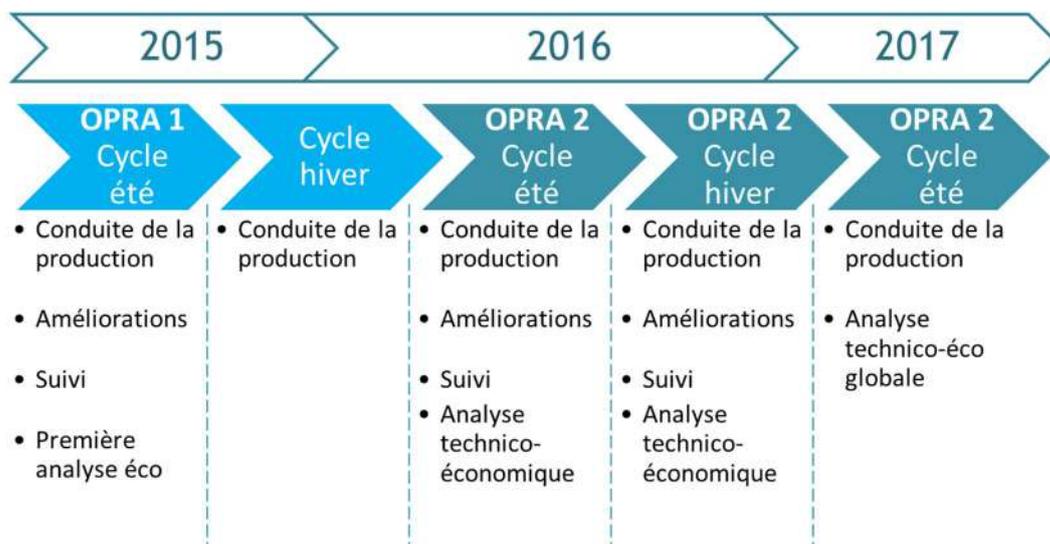


Figure 8 : calendrier du projet OPRA2 (d'après Benoit, 2016)

Les objectifs d'OPRA2 sont d'une part, de vérifier si une unité aquaponique artisanale dite « low cost » avec un minimum d'investissement peut être rentable ou pas, c'est-à-dire pouvant générer un chiffre d'affaires suffisant pour couvrir un ETP (Equivalent Temps Plein) et l'ensemble des charges d'exploitation et d'autre part, de définir le dimensionnement minimum permettant cette rentabilité.

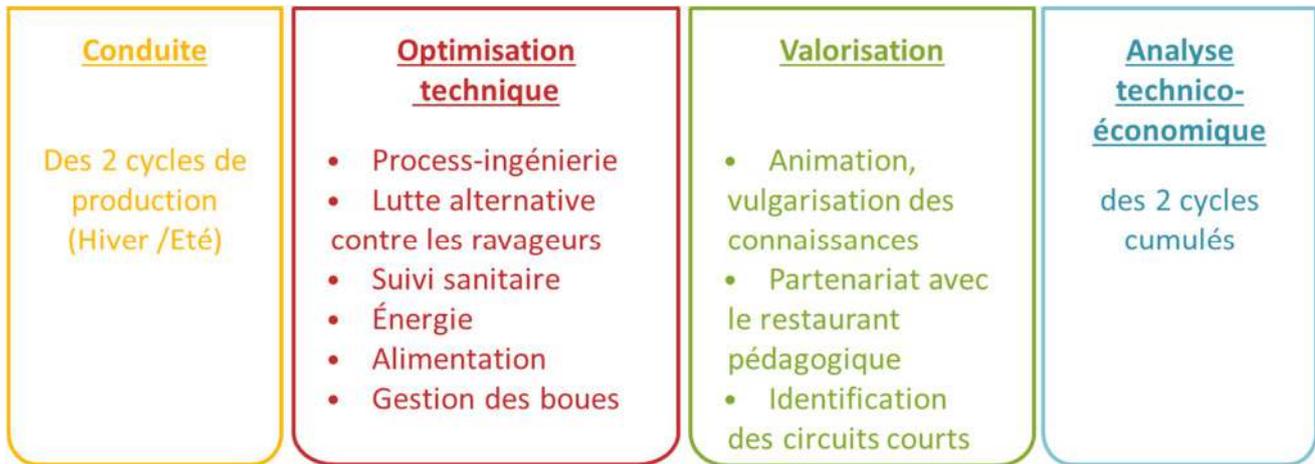


Figure 9 : objectifs d'OPRA2

L'outil expérimental a été conçu initialement pour une vocation pédagogique avec un minimum d'investissement, ce qui nous oriente vers deux cycles de production adaptés aux conditions saisonnières. Les actions vont être multiples afin d'optimiser le pilote notamment sur la conduite d'élevage et de culture, sur l'optimisation technique et sur la valorisation des produits. Une analyse technico économique sera ensuite conduite (figure 9).

L'ensemble des enseignements que ce soit au niveau de la conduite de production, de l'optimisation des structures, de la valorisation ou des estimations économiques obtenus seront communiqués aux professionnels. Ces éléments pourront également permettre de participer à la création d'une formation qualifiante en aquaponie.

## 2.2. Supports techniques du pilote OPRA2

Cette installation a été financée par la région Pays de la Loire, par le SMIDAP ainsi par que le lycée et entièrement montée par les élèves en formation aquaculture, les encadrants et les techniciens internes à l'établissement.

L'outil technique utilisé est une serre tunnel en plastique de 120 m<sup>2</sup> (figure 10). La structure est constituée d'un système hydraulique simple, de fabrication rustique et artisanale, ce qui permet d'avoir un outil de taille adaptée et facile à utiliser.

Ce pilote aquaponique est composé de trois compartiments (figure 11) :

- Le compartiment piscicole ;
- L'unité de traitement de l'eau ;
- Le compartiment hydroponique.



Figure 10 : photo de l'entrée principale du pilote OPRA (smidap)

L'eau utilisée est de l'eau de ville car c'est la seule source d'eau disponible sur le site du pilote.

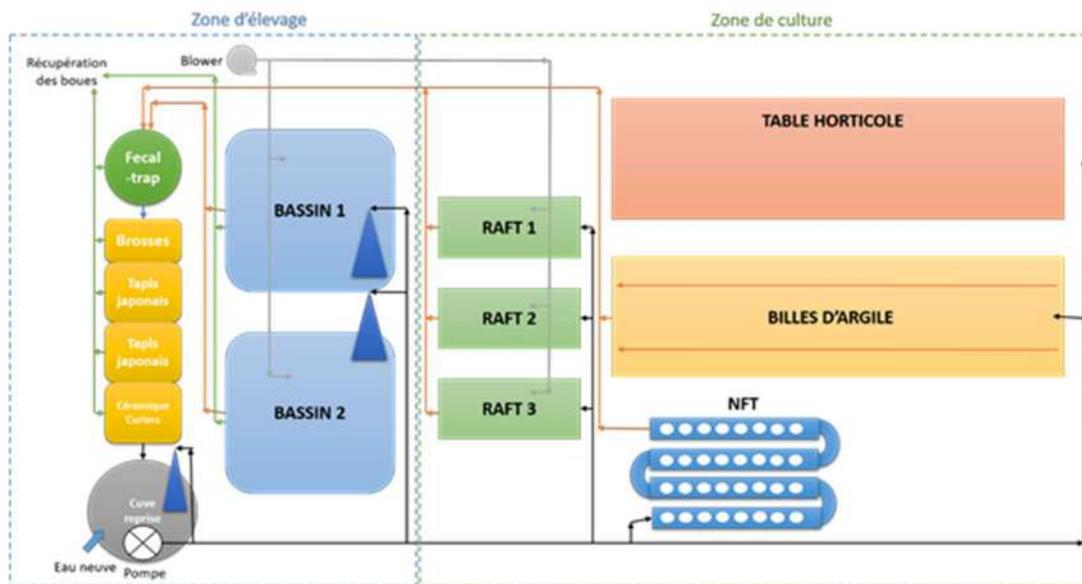


Figure 11 : schéma de principe de l'installation guérandaise avant optimisation (Laviale, 2015)

### 2.2.1. Unité de traitement de l'eau

Les effluents en sortie de bassins piscicoles sont collectés dans un fecal-trap cylindro-conique de qui est muni d'une paroi centrale pour diriger le flux vers le bas du système avant de récupérer l'eau par surverse et d'un filet de filtration qui diminue de la vitesse de l'eau permettant une décantation et un piégeage des plus grosses matières solides (figure 12). L'eau de surverse est ensuite évacuée vers un filtre multichambre Exclusivepond (modèle Eurofia 4 chambres pro), habituellement utilisé pour les bassins de jardin. Ce filtre est composé de 4 chambres, la première équipée de brosses, la seconde et la troisième de tapis japonais pour la filtration mécanique et la dernière, de 100 litres de céramique ainsi que de curlers plastiques (fixes) pour assurer la filtration biologique (nitrification). Dans l'ensemble de ce filtre, l'eau entre dans les chambres par le fond et est évacuée par surverse pour améliorer l'efficacité de filtration. L'eau arrive ensuite dans une cuve de reprise en partie enterrée et d'un volume de 500 litres (figure12). Le filtre biologique représente un volume de 1m<sup>3</sup>. Le support de filtration est composé de curlers et de céramiques présentant une capacité de plus de 800m<sup>2</sup>/ m<sup>3</sup>. Avec une biomasse piscicole supposée à sa charge maximale de 100 kg et un taux de rationnement de 2%, les dimensions du filtre biologique sont tout à fait suffisantes pour couvrir l'action de nitrification de l'eau du système. L'eau retourne ensuite, grâce à une pompe immergée (Calpeda MP C11, 11 à 15 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>), dans les bassins d'élevage et vers les structures de cultures végétales via un circuit en dérivation.



Figure 12 : photo du compartiment filtration (Laviale, 2015)

L'eau de la cuve de reprise est ensuite pompée avec un débit de 11 à 15 m<sup>3</sup>/h pour être renvoyée dans les bassins pour 90% et dans l'unité végétale (10%) grâce à un circuit en dérivation.

La structure est complétée par une soufflante, ou blower, d'une puissance de 0.4 kW, qui délivre un débit d'air de 10 m<sup>3</sup>/h pour une pression de 200 mBar. Elle oxygène l'eau par des apports au niveau des bassins d'élevage et de des Rafts de culture.

### 2.2.2. Compartiment piscicole

La structure d'élevage se compose de deux bassins sub-carrés de 2.5 m<sup>3</sup> chacun permettant une capacité d'élevage maximum de 100 kg (figure 13). Le bassin est alimenté en eau en sortie d'une colonne de dégazage de 70 cm de hauteur. L'eau s'évacue au niveau d'une crépine centrale du bassin. La régulation du niveau d'eau est assurée par une double perche en sortie de bassin. L'eau est ensuite envoyée par gravité vers les systèmes de filtration avec un débit de 6 à 10 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> selon les besoins.



Figure 13 : photo des deux bassins d'élevage ( smidap)

### 2.2.3. Compartiment végétal

La structure de production en hydroponie est constituée dans un premier temps de quatre supports différents ; le Raft, le NFT ainsi que deux supports de culture à substrats inertes ou partiellement ; le pain de coco et la bille d'argile. Un autre support, la colonne verticale, et un autre substrat inerte, la perlite, seront testés. Le principe est de comparer ces différents supports avec plusieurs espèces végétales afin de déterminer les meilleurs scénarios pour le futur dimensionnement.

#### 2.2.3.1. Rafts (Deep Water Culture)

Le support le plus couramment utilisé en aquaponie est le système de radeaux flottants (Raft). Cette technique permet des rotations de culture et un plan de gestion plus faciles. Les Rafts sont des plaques flottantes en polystyrène extrudé habituellement utilisé en hydroponie directement posées sur l'eau. Les plaques de culture sont trouées avec des densités de culture adaptées à la stratégie de production visée. Les plants sont disposés directement dans les trous ou indirectement dans des petits pots contenant un substrat inerte (figure 14). Les plaques de polystyrène sont remplacées par des plaques de lièges, écologiquement plus intéressantes.

La structure compte trois systèmes Rafts (figure 11), chacun présentant une surface de 2 m<sup>2</sup>, flottant sur une hauteur d'eau de 30 cm. La densité de plantation par radeau est de 20 plants/m<sup>2</sup>.

#### 2.2.3.2. Serpentin NFT (Nutrient Film Technique).

C'est une des techniques sans substrat les plus utilisées en horticulture. Comme il est très difficile d'aérer un liquide stagnant, le milieu nutritif circule sur une faible épaisseur (une fine pellicule d'eau) sous les racines, ce qui apporte une forte oxygénation du liquide nutritif. Le support, de type « NFT », a été conçu à partir de tube PVC perforé afin d'y incorporé des pots de culture. L'eau et le milieu nutritif circulent en permanence sur une faible épaisseur (une fine pellicule d'eau) sous les racines, ce qui apporte une forte oxygénation du liquide nutritif.

Le système NFT en forme de serpentin mis en place permet d'avoir 10 mètres de linéaire de culture pour seulement 2.8 m<sup>2</sup> d'occupation au sol, avec une capacité de quatre-vingt-six plants (figure 14).

### 2.2.3.3. Techniques de culture sur lit de substrats inertes (MFG : Media Filled Growbed)

Ces médias sont plutôt utilisés pour l'aquaponie de loisirs. Le pilote dispose aussi de deux supports de culture sur substrats inertes ou partiellement ; les pains de coco et les billes d'argile.

#### - Pains de coco

Les fibres de cocos sont fabriquées à partir de l'écorce de noix de coco râpée, puis traitée. Ce matériau se trouve sous forme de pains ou sous forme brute. Les pains de coco sont des sacs (dimensions 98x20x10 cm) de la marque PALMECO rempli de fibres de coco. Ce substrat est couramment utilisé en hydroponie car il permet un bon enracinement et se dégrade peu tout en apportant une bonne aération sans impacter la qualité de l'eau. L'irrigation se fait par des systèmes de goutte à goutte. La possibilité de densité de plantation est de dix plants par pain mais la disponibilité en plant a limité la densité effective à six plants par pain. Les sacs sont disposés sur une table horticole de 8,4 m<sup>2</sup> permettant d'accueillir vingt sacs (figure 14).

#### - Billes d'argiles

Les billes d'argile sont réalisées à partir d'argile expansée. Elles possèdent un bon pouvoir isolant, ce qui est nécessaire pour protéger les racines des changements de température. Leur capacité de rétention en eau est de 15 % en masse (Laviale, 2015). La culture sur billes d'argile est réalisée sur une autre table horticole de 8,4 m<sup>2</sup>. Les billes d'argile ont été concentrées dans des cagettes (dimension 30x60x15cm) permettant une hauteur d'enracinement de 15 cm. Quatre plants de tomates sont disposés par cagette. La table supporte douze unités, soit une densité de quarante-huit plants pour 8,4m<sup>2</sup>. L'irrigation est permise par des asperseurs à 360° (deux par cagette) et par circulation de l'eau sur la table à la base des billes d'argile (figure 14).



Figure 14 : photos de quatre supports hydroponiques testés, le raft, le pain de coco, la bille d'argile et le NFT (smidap).

### - Perlite

La perlite est un sable siliceux d'origine volcanique contenant de l'eau qui est expansé industriellement par un traitement à la chaleur. (Borovinšek *et al.*, 2016). Des essais de culture sur perlite sont mis en place dans des jardinières en plastique posées sur les tables horticoles. Environ vingt-trois plants de radis sont disposés par jardinière (figure 15).



Figure 15 : photo de jardinières avec perlites (smidap)

### 2.2.3.4. Colonnes

L'entreprise Bright Agrotech, située dans le Queensland en Australie, conçoit et développe des systèmes de culture verticaux, sous le nom de ZIPGROW, dédiés aux professionnels comme aux particuliers, pour l'hydroponie et l'aquaponie. La serre comporte douze colonnes ZipGrow, des colonnes verticales de 75 cm (au lieu de 130 cm normalement) de section carrées remplies d'un substrat filtre appelé « Matrix Média », développées par la compagnie Bright Agrotech. Cette technique permet une optimisation de l'espace (figure 6).



Figure 16 : colonnes « ZipGrow » testées pour OPRA 2 (smidap)

## 2.3. Sélection des espèces

Les choix des espèces végétales et piscicoles constituent une base de l'étude OPRA, l'objectif étant de réussir à produire au sein des deux compartiments, de façon rentable, sur deux cycles de production annuels. L'aquaponie constitue un mode de production basé sur l'équilibre entre les différents compartiments ; cet équilibre est continuellement réajusté compte tenu de la croissance des poissons et des végétaux mais aussi des retraits réguliers destinés à la commercialisation.

Pour le volet végétal, les espèces les plus utilisées en aquaponie sont la salade, la tomate et le basilic (figure 17). Pour notre étude, l'identification des espèces les plus pertinentes selon le cycle de production hivernal ou estival a nécessité un travail d'analyse de la veille bibliographique (Rackocy *et al.*, 2006 ; (Love *et al.*, 2014 ; Foucard *et al.*, 2015 ; Afsharipoor & Roosta, 2010 ; Gangenes Skar *et al.*, 2015), des discussions entre les différents partenaires du projets (groupe de travail OPRA et CTIFL) et des précédentes expériences réalisées sur le pilote.

A ce jour, les espèces piscicoles les plus utilisées en aquaponie dans le monde (figure 17) sont le tilapia (surtout *Oreochromis niloticus*), les poissons d'ornements type carpe koi (*Cyprinus carpio*) et le catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). En Amérique du Nord, en Europe et en France, la truite arc en ciel est aussi souvent élevée (*Oncorhynchus mykiss*). Ces espèces sont-elles pour autant de bonnes candidates dans le contexte national et local ainsi que dans notre système de production qui reposera sur un cycle hivernal et un cycle estival ?

Afin de répondre au mieux à cette question, une hiérarchie des espèces est établie à partir d'une identification détaillée des contraintes de notre système, d'une recherche bibliographique approfondie et de l'établissement d'un barème pour chaque critère défini. Quémener *et al.*, 2002 proposent une méthode de classement des espèces en voie d'une diversification de l'aquaculture marine. Cette méthode n'est pas applicable à notre étude mais elle a orienté les réflexions dans l'identification des critères. Ces derniers sont fixés en groupe de travail et reposent sur les considérations de diverses études de diversification aquacole (Policar, 2011; Foucard *et al.*, 2015). Ainsi, cinq grands critères sont retenus : les caractéristiques de l'espèce, la zootechnie, le sanitaire, la réglementation et le marché (tableau 5).

Concernant le premier critère, les contraintes physico-chimiques de notre système sont évaluées à partir des paramètres quantifiés sur le projet OPRA1 (Laviale, 2015). La température optimale de croissance, la plasticité thermique, la tolérance vis à vis de paramètres physico chimiques comme le pH, l'oxygène ou encore l'ammoniaque sont analysées selon les espèces choisies. Sur les aspects zootechniques, les choix se sont orientés sur des paramètres de maîtrise d'élevage comme la densité, la ration de conversion alimentaire, la domestication, le comportement de l'espèce en système RAS etc.

Tableau 5 : critères de classement technico-économique des espèces candidates en aquaponie.

Critère		Remarques et description
1	Caractéristiques de l'espèce	Correspond à l'adaptabilité de l'espèce face aux contraintes physico- chimiques de notre système (Température, Azote, phosphate, pH, O2).
2	Zootechnie	Correspond à la maîtrise d'élevage via des paramètres zootechniques (domestication, efficacité alimentaire, comportement, disponibilité en alevins, hétérogénéité, cannibalisme, croissance...)
3	Sanitaire	Correspond à la sensibilité aux maladies courantes et ou/et aux maladies réglementaires.
4	Réglementation	Correspond à 4 degrés d'autorisations réglementaires de l'élevage piscicole.
5	Marché	Correspond aux possibilités de valorisation (prix potentiels, diversité des tailles et des marchés, valorisation pour la consommation humaine, demande)

Le critère sanitaire est noté en vue d'une évaluation des risques dans la poursuite de l'étude économique. La sensibilité à des pathogènes spécifiques ou non est regardée ainsi que la sensibilité à une des maladies à déclaration obligatoire répertoriés à l'annexe IV de la Directive 2006/88/CE relative aux conditions de police sanitaire applicables aux animaux et aux produits d'aquaculture, et relative à la prévention de certaines maladies chez les animaux aquatiques et aux mesures de lutte contre ces maladies.

Le critère réglementaire constitue un élément important dans le choix des espèces pour un éleveur. La réglementation nationale est parfois plus drastique que la réglementation européenne, en particulier pour l'élevage de certaines espèces non représentées dans les eaux françaises. Une notation sera proposée en fonction du statut de l'espèce par rapport au Code de l'Environnement. Certaines, officiellement représentées dans les eaux françaises, nécessitent peu ou pas de démarches administratives mais d'autres vont requérir une autorisation préfectorale voire sont interdites d'élevage.

Enfin, le critère de marché est primordial dans le cadre de l'étude économique. Il est aussi l'un des facteurs clé de choix des pisciculteurs mentionné lors des entretiens avec les porteurs de projets. Les marchés locaux et régionaux sont privilégiés. Certaines espèces n'ayant peu d'intérêt dans les Pays de la Loire peuvent constituer des débouchés plus intéressants dans d'autres régions. La proximité et la diversité des marchés ainsi que la valeur ajoutée des espèces sont des paramètres retenus.

Jean François Baroiller  
CIRAD

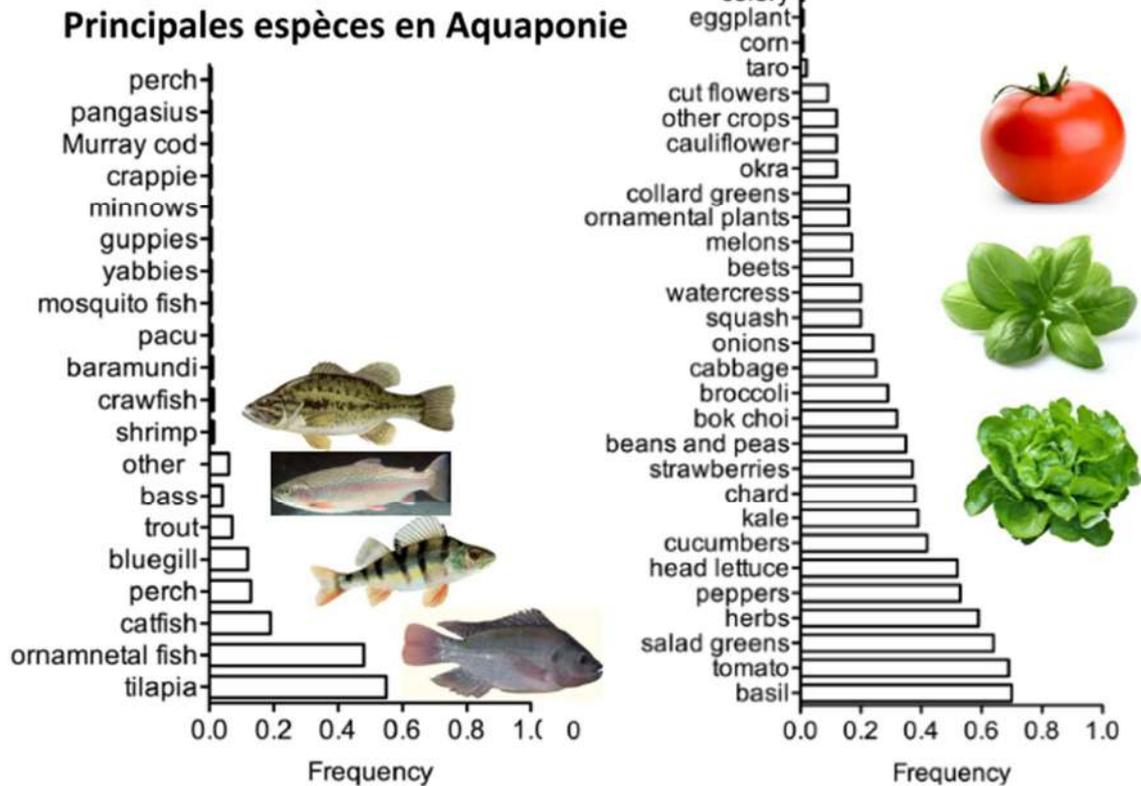


Figure 17 : principales espèces élevées ou cultivées en aquaponie (Baroiller JF, *In* Tocqueville *et al.*, 2015)

## 2.4. Méthodologie de suivi et indicateurs de performance

Une fois les espèces choisies et introduites dans le système, deux types de suivis sont effectués, un sur le milieu du système et l'autre sur les performances des animaux et des végétaux.

### 2.4.1. Suivi de la qualité de l'eau

Les paramètres d'élevage de routine (pH, saturation de l'oxygène et température) sont mesurés quotidiennement en début de journée dans les bassins d'élevage. Deux fois par semaine, une mesure de la conductivité de l'eau (EC) est aussi réalisée dans la cuve de reprise. L'EC est ici considéré comme un paramètre de référence pour la production végétale (annexe 1).

Une analyse d'eau hebdomadaire est aussi effectuée en trois points de prélèvements, cuve de reprise, sortie bassins et sortie des supports végétaux. Ces points de prélèvement ont été choisis afin d'avoir un aperçu amont-aval de la qualité de l'eau en provenance des deux systèmes de productions (culture et élevage), l'eau de la cuve de reprise faisant office de point initial. 50 cl d'eau sont prélevés à chaque point. Les paramètres analysés sont les éléments nutritifs (Azote, Phosphate et Potassium) ainsi que le fer et la dureté totale. Les gammes et les méthodes de mesure sont détaillées dans le tableau 6.

Des analyses complémentaires sont réalisées de façon mensuelle par des laboratoires agréés afin notamment d'obtenir le dosage de certains oligo-éléments comme par exemples le Fer, le Cuivre, le Manganèse, le Zinc, le Bore, le Calcium et le Potassium. Nous ne développerons pas ces analyses ici mais en présentons un exemple de résultats en annexe (annexe 4).

Tableau 6 : paramètres de qualité de l'eau analysés

Paramètre mesuré	Méthode	Plage de mesure	Unité	Fréquence de mesure
Azote ammoniacal (NH <sub>3</sub> -N)	Spectrophotométrie _ Méthode Nessler	0,00 - 3,00	mg/L	Hebdomadaire
Dureté totale	Titration colorimétrique EDTA	0-30	° français	Bimensuelle
Fer (Fe II)	Spectrophotométrie_ phenantroline	0,00 - 5,00	mg/L	Bimensuelle
Nitrate (NO <sub>3</sub> -N)	Spectrophotométrie_méthode du cadmium		mg/L	Hebdomadaire
Nitrite (NO <sub>2</sub> -N)	Spectrophotométrie_méthode EPA	0,00-0,35	mg/L	Hebdomadaire
Phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Spectrophotométrie_Acide aminé	0,00 - 30,0	mg/L	Hebdomadaire
Potassium (K <sup>+</sup> )	Turbidimétrie	0 - 250	mg/L	Bimensuelle

### 2.4.2. Suivi piscicole

Deux espèces piscicoles sont choisies en fonction des conditions saisonnières, une pour le cycle de production hivernal, une pour le cycle de production estival.

Chaque bassin contient un distributeur d'aliments où 80-90% de la ration quotidienne est distribuée. Le reste est donné à la main, permettant une observation de la prise alimentaire, très importante pour étudier l'état de santé des individus. Des siphonages et des purges sont effectués quotidiennement afin d'assurer la bonne circulation et la propreté du système (annexe 1).

Les quantités d'aliments distribuées (g) et les mortalités sont relevées quotidiennement. Les poids moyen (g) sont mesurés également toutes les deux semaines pour les petits spécimens et tous les mois pour les plus gros poissons, permettant d'adapter les rations alimentaires.

$$\text{Gain de Poids (g)} = (\text{Poids Moyen FINAL} - \text{Poids Moyen INITIAL})$$

$$\text{Indice de consommation} = \text{Poids d'aliment consommé (g)} / \text{Gain de Poids (g)}$$

$$\text{Survie (\%)} = (\text{Nombre de poissons à la sortie du cycle} / \text{Nombre de poissons à l'entrée}) * 100$$

### 2.4.3. Suivi végétal

Un entretien quotidien est effectué sur le compartiment végétal. Chaque récolte est effectuée dès que les fruits sont murs. Elles sont décomptées, et pesées selon la date, l'espèce, la variété et le support (annexe 1).

Les suivis de rendements de culture sont assurés par des récoltes deux à trois fois par semaine. Les récoltes sont pesées pour chaque pied permettant d'obtenir des poids moyens par plante, variété et support de production (annexe 1). Les données ont ensuite été cumulées afin d'obtenir un rendement moyen hebdomadaire par variété et par plant. L'unité est le gramme/plant/semaine. La densité de culture permet de transférer les rendements par plants en rendement par m<sup>2</sup> ou par mètre linéaire. Les cultures sur raft et billes d'argile s'évaluent par m<sup>2</sup> et les cultures sur NFT et Pains de coco en mètre linéaire.

$$\text{Densité de culture} = \text{nombre de plants} / \text{m}^2$$

$$\text{Rendement moyen de chaque espèce (g/semaine/m}^2\text{)} = \text{Poids de la récolte (g)} / \text{m}^2 \text{ ou (g/ml) selon le support utilisé.}$$

#### 2.4.4. Entretien du système

Un système d'aquaponie, tel que celui du pilote, représente une charge de travail d'entretien discontinue ainsi qu'une présence quotidienne. Sur le plant végétal, les tâches principales sont la mise en place des plantes et les récoltes. Un entretien particulier (effeuillage, tuteurage) est apporté aux tomates. Une coupe régulière des stolons doit être effectuée sur les fraisiers. Un siphonage des matières en suspension est effectué de façon mensuelle dans les bacs des rafts. Enfin, l'observation de l'état sanitaire des plantes est réalisée quotidiennement. L'entretien de la partie piscicole nécessite une surveillance quotidienne, l'apport des aliments deux fois par jours, la prise de mesures des paramètres de l'eau, le nettoyage des bassins. L'outil de filtration est aussi nettoyé mensuellement pour permettre une bonne efficacité. Enfin, des apports en Fer et en Bicarbonate sont réalisés régulièrement pour réduire les carences en fer et maintenir le pH. Toutes ces tâches sont essentielles au bon fonctionnement de l'outil et sont quantifiées afin d'être prises en compte dans l'analyse économique (annexe 1).

### 2.5. Méthode d'analyses technico économiques

#### 2.5.1. Hypothèses d'analyse

L'objectif de cette étude est d'étudier les conditions d'optimisation des aspects techniques dans une perspective de rentabilité économique à partir d'une unité aquaponique dite « low cost » réalisée avec le minimum d'investissements. On se place dans le cadre d'un complément de revenu économique pour un pisciculteur ou un horticulteur / maraicher avec le recrutement d'un ETP jugé indispensable pour le suivi et la gestion des productions piscicole et végétale.

La première hypothèse choisie est le dimensionnement de la station aquaponique. Le scénario économique adopté considère une surface de culture permettant de produire et de procurer un chiffre d'affaires couvrant les charges d'un ETP et d'une partie des charges fixes et variables du système aquaponique. La taille de la serre est donc estimée en fonction d'un chiffre d'affaires (CA) minimum. Aujourd'hui, le manque de connaissance sur le rendement d'un tunnel d'aquaponie rend difficile l'estimation d'un CA. Dans le secteur horticole ornemental français, un ETP génère en moyenne 74 167€ de chiffre d'affaires (FranceAgrimer, 2015), alors qu'en maraichage biologique, la fourchette est comprise entre 30 000 et 60 000€ de CA / ETP (Jouanneau & Froger, 2010). Cette seconde fourchette est privilégiée dans l'approche durable de l'étude. De plus, la rémunération d'un salarié fixée au Salaire Minimum de Croissance (SMIC) coûte environ 20 000 euros à l'année à une entreprise auquel il faut ajouter les autres charges d'exploitation et les dépenses d'investissement. Les charges n'ayant pas encore été évaluées, l'hypothèse d'un CA annuel large de 50 000 €/ ETP est proposée dans notre étude.

A partir des éléments de production obtenus au cours de l'étude et de la détermination des prix pour chaque espèce, une estimation du CA par unité de production est établie puis un premier dimensionnement du système. Une attention particulière a été portée sur la faisabilité, en termes de temps de travail, d'une gestion des productions piscicole et végétale par un ETP. La mesure du temps passé pour chaque tâche sur chaque support de production est donc mesurée.

Un inventaire des coûts d'investissements et des coûts d'exploitation est réalisé en vue de l'analyse de rentabilité. Concernant les coûts d'investissements, dans le cadre d'une diversification d'activité, l'hypothèse de départ suppose que le porteur de projet est déjà propriétaire du terrain sur lequel le tunnel de culture sera installé. Ce postulat permet de s'affranchir des coûts immobiliers (annuités d'emprunts notamment).

Concernant la valorisation des produits et des débouchés, la conduite de la production a révélé des conditions particulières à prendre en compte pour l'étude économique. La production en hydroponie entraîne des contraintes de conservation. Les observations montrent qu'un légume feuille issu d'aquaponie dispose d'un délai de conservation court afin de conserver une fraîcheur et une qualité visuelle suffisante pour la commercialisation. Deux possibilités se sont alors dégagées : la valorisation par circuit court ou la transformation des produits par le producteur. Le choix d'hypothèse de départ s'est orienté vers la valorisation par des circuits courts afin de limiter les difficultés de mise en place pour un professionnel. En effet, la mise en place d'un laboratoire de transformation, la maîtrise des débouchés commerciaux, les contraintes du process et des règles HACCP, les procédures d'emballage et d'étiquetage, sont autant de compétences à acquérir difficiles à transférer et à mettre en place pour l'objectif fixé d'un ETP. Concernant la valorisation par circuit court, là encore, plusieurs pistes semblent possibles, avec une vente directe aux restaurateurs ou une vente directe chez le producteur sous forme de paniers ou de cueillettes en libre-service. Les études concernant les attentes des consommateurs montrent que le souhait est d'acheter de plus en plus des produits locaux, dont ils connaissent le mode de production (Pillaert, 2014). Ainsi, la production en aquaponie peut s'agrémenter d'un aspect ludique qui participe à son marketing et inciterait les clients à se déplacer. Par exemple, de

nombreuses entreprises proposent des visites du site de production et trouvent là une forme de valorisation (Tocqueville *et al.*, 2016). Les marchés de proximité et de circuits courts sont retenus dans notre étude.

Enfin, la prise en compte d'aléas permettrait d'analyser la variabilité et la sensibilité des résultats économiques. Un inventaire des aléas rencontrés sera réalisé pour la poursuite d'étude.

Les hypothèses retenues sont donc :

- Dimensionnement pour 1 ETP,
- Chiffre d'Affaires annuel de 50 000€ (réparti entre les productions piscicoles et végétales selon les résultats techniques),
- Dans le cadre d'une diversification d'activité piscicole ou horticole/maraichère,
- Avec une valorisation par circuit court,
- Avec des prix indexés sur les prix de la région Pays de la Loire.

## 2.5.2. Etude des mises en marché

### - Le végétal

Compte tenu du caractère régional de notre étude, les prix retenus ont été ceux observés en Pays de la Loire et plus particulièrement les prix sur le Marché d'Intérêt National de Nantes, prix disponibles sur le site internet de FranceAgriMer (Réseau des Nouvelles des Marchés).

Une étude de séries chronologiques des prix a été réalisée (détaillés dans le point 5.2.1) pour chaque espèce végétale et pour deux types de marché :

- le marché de gros Bio / observé à Nantes,
- le marché Bio de détail / observé à Nantes.

Lorsque les prix en Bio détail ou gros n'étaient pas disponibles, la référence du marché de gros en agriculture conventionnelle (observé à Nantes ou à Rungis) a été utilisée.

Les séries chronologiques ont été analysées pour mettre en évidence la tendance sur les dernières années (trend) et la saisonnalité mensuelle des prix. Toutefois pour simplifier la première approche de cette étude, une moyenne prévisionnelle des prix mensuels sur trois années consécutives (2012 à 2015) et sur les douze mois du cycle a permis de déterminer les prix de vente fixés pour notre étude.

Les prix de vente des fruits, légumes et plantes aromatiques sont calqués sur les tarifs moyens au détail observés sur les marchés biologiques des Pays de la Loire sur une période de 6 mois pour la production estivale. Pour la production hivernale, les prix de vente en magasins spécialisés bio sur le site de cotations FranceAgriMer sont relevés.

L'enregistrement des données de FranceAgriMer montre une hétérogénéité. Certaines séries sont journalières avec cinq jours de cotation par semaine, d'autres n'ont que quatre jours de cotation, alors que certaines sont seulement hebdomadaires. Les ruptures de cotation en lien avec les productions saisonnières et la disponibilité des produits selon les années constituent une contrainte importante dans l'analyse économétrique des séries de prix. Les données recherchées correspondant aux espèces végétales retenues dans notre station ne sont disponibles que sur quelques années (les plus longues séries remontent seulement à 2013) et les séries n'offrent que deux ou trois années à comparer.

Pour toutes ces raisons, une analyse avec un modèle de série temporelle n'a pas été possible avec les données disponibles. Après de nombreux essais sur plusieurs séries, un modèle classique MCO ne parvient pas non plus à dégager une tendance, compte tenu du manque d'années à disposition. Les chocs conjoncturels, si faibles soient-ils, empêchent d'observer les mécanismes de long terme, qui auraient pu être visibles sur une période plus longue, avec des séries de cinq ou dix ans par exemple. Même les traces de l'inflation ne sont pas clairement détectables. La méthode économétrique de co-intégration des différents marchés aurait pu résoudre ce problème mais les différences de fréquence et de période d'interruption entre les séries ne permettent pas de l'utiliser sur une période aussi courte (Hinckel & Louis-Sydney, 2017).

Un des critères de choix des espèces piscicoles concerne la variabilité des marchés. Les références des prix de marchés sont moins connues. Pour le marché de l'alimentation humaine, les prix du bio serviront de repères selon l'espèce considérée. Les autres marchés comme le repeuplement ou l'ornement sont plus rémunérateurs. Les prix pratiqués par les pisciculteurs ligériens serviront de références dont certains sont répertoriés dans l'analyse technico économique réalisée sur la pisciculture en étang des Pays de la Loire en 2016 (Trintignac *et al.*, 2016).

### 2.5.3. Outils techniques

Un fichier Excel a finalement été créé permettant de comparer les jeux de données entre eux et de dégager une saisonnalité mensuelle. Il est conçu pour importer facilement les données au format proposé par FranceAgriMer et pour proposer instantanément des graphes à partir de ces séries qui font ressortir ces variations saisonnières. En fonction des données disponibles par espèce, le premier type de graphe permet de voir l'évolution du prix semaine par semaine pour les différentes années.

Deux bases de données ont été construites dans cette étude. La «Base de Données Brutes» compile l'ensemble des données récoltées au cours de l'expérimentation. Elle est organisée en mesures quotidiennes. La pertinence des mesures récoltées est évaluée et précisée dans la colonne de «validation des données» qui nous permettra ensuite d'éliminer les valeurs non valides lors de l'interprétation. L'«outil de calcul OPRA» reprend les informations de productions recueillies sur le pilote, ainsi que les prix de ventes et les charges identifiées. Il permettra de réaliser la simulation de différents scénarios économiques avec comme finalité l'évaluation de la rentabilité.

### 2.5.4. Méthode de dimensionnement

Un des enjeux en aquaponie est de trouver l'équilibre entre la surface végétale et la surface d'élevage.

Le Rapport des Taux d'Alimentation (RTA), développé sur des systèmes semi commerciaux, est utilisé dans cette étude pour trouver cet équilibre permettant de déterminer la quantité d'aliment à distribuer en fonction de la surface utile végétale (Lennard, 2012).

Il se définit comme suit :

$$RTA = \frac{\text{Quantité aliment distribué par jour (g/j)}}{\text{Surface utile végétale (m}^2\text{)}}$$

A partir de notre surface végétale, la quantité d'aliment à distribuer par jour ainsi que la biomasse piscicole à intégrer dans le système peuvent être déterminées en fonction de l'espèce et de son taux d'alimentation. Le nombre de bassins à prendre en compte dans le système pourra être défini en fonction de la densité d'élevage voulue.

La complexité de cette approche vient du fait que beaucoup de facteurs rentrent en jeu dans la détermination de ce ratio. En effet, ce dernier dépend de la densité piscicole, du type d'aliment utilisé donc de l'espèce piscicole intégrée dans le système, son stade de croissance, des plantes cultivées et leur stade phénologique.

D'après la bibliographie, en plus de prendre en compte les facteurs précédents, les valeurs de RTA sont d'environ 60 g/m<sup>2</sup>/jour pour des aromates et laitues et de 100 g/m<sup>2</sup>/jour pour des légumes type tomates, poivrons qui ont des besoins nutritifs plus élevés (Rackocy *et al.*, 2006 ; Timmons & Ebeling, 2007 ; Foucard *et al.*, 2015). D'autres experts considèrent que la valeur optimale du RTA doit être comprise entre 40 et 80 g/m<sup>2</sup>/jour (FAO, 2014a).

Il est également important de tenir compte de l'ouverture de notre système, la teneur en éléments nutritifs variant facilement selon le renouvellement en eau du système avec un ratio à prendre en compte.

Le renouvellement de l'eau est défini comme suit :

$$\frac{\text{Quantité d'eau neuve (L)}}{\text{Quantité d'aliment distribuée}}$$

Plus le renouvellement sera important et plus les éléments seront dilués dans le système (Foucard *et al.*, 2015).

Un RTA cohérent avec les paramètres de la serre dimensionnée sera déterminé.

#### 2.5.4.1. Végétal

A partir des expérimentations sur les différentes phases d'études, plusieurs espèces seront retenues pour le scénario économique de la serre à dimensionner. A partir des critères de performance, les rendements mensuels et non par cycle seront déterminés à partir des rendements calculés lors de nos deux phases d'étude d'OPRA mais aussi à partir de rendements théoriques trouvés dans la bibliographie ou à l'aide d'organismes agricoles des Pays de Loire.

Avec les prix récupérés selon la méthodologie décrite au paragraphe 2.5.2, un chiffre d'affaires végétal /support /m<sup>2</sup> à partir du couple espèces/support sélectionnés pour la serre projet sera calculé. Ce CA sera déterminé à partir des rendements et des prix établis mensuellement. Les ratios % CA / support par rapport au CA total seront appliqués à la surface utile végétale de la serre pour déterminer les surfaces / support végétaux de la nouvelle serre projet (figure 18).

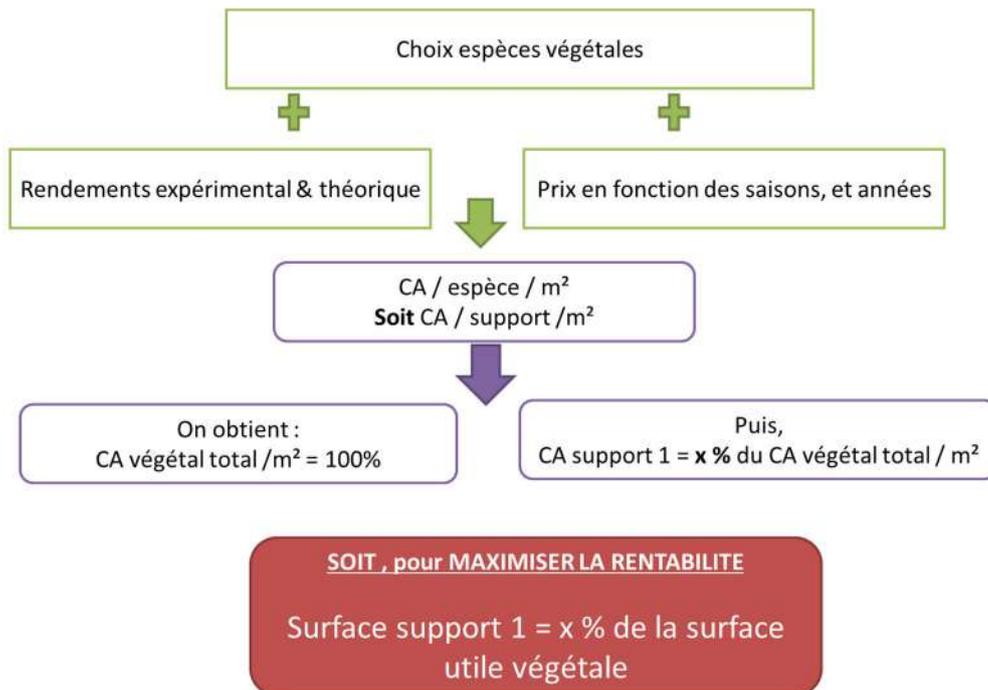


Figure 18 : méthode de détermination des surfaces de supports végétaux dans la serre projet (Perrot, 2017)

#### 2.5.4.2. Piscicole

A partir des espèces sélectionnées, les biomasses retenues seront intégrées dans le système à partir de l'application du RTA. Ainsi, les scénarios piscicoles présentant, les marges brutes les plus grandes, seront évalués, permettant de choisir les itinéraires les plus intéressants économiquement. Les aspects techniques comme les caractéristiques d'élevage, les performances zootechniques seront également pris en compte dans le choix final de calibre de poisson à intégrer pour chaque espèce. Ces résultats dépendront donc des performances zootechniques obtenues, du prix du marché, du débouché mais également du prix d'approvisionnement (figure 19).

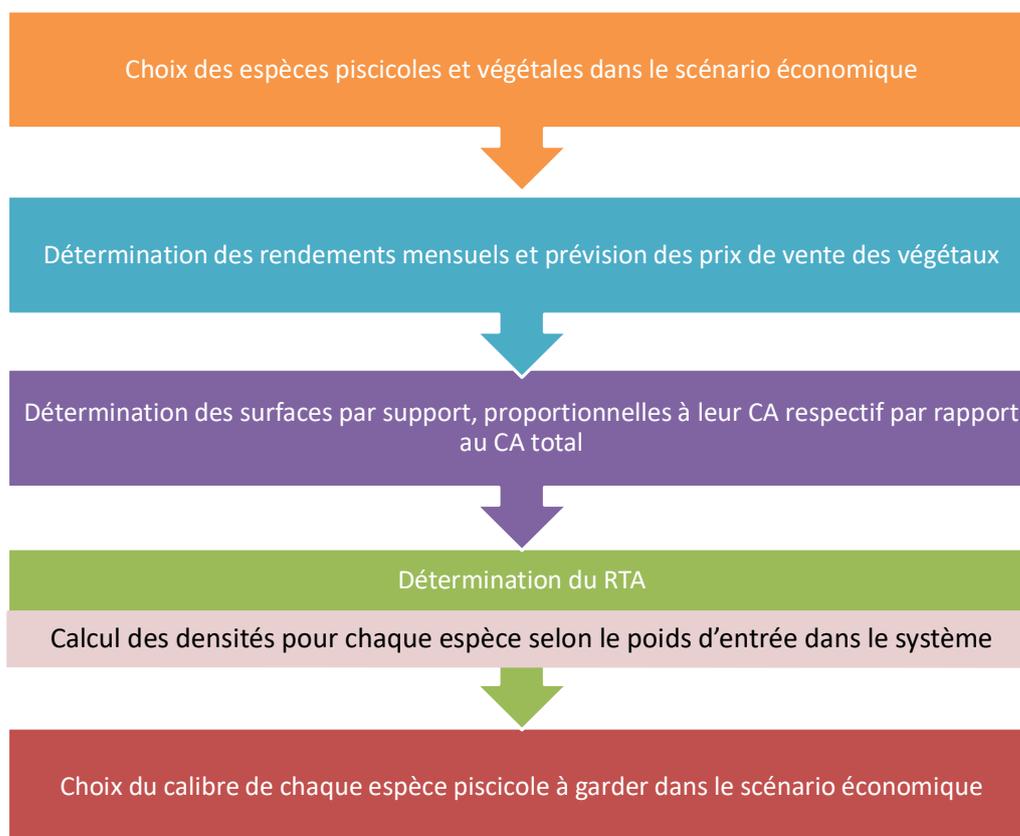


Figure 19 : schématisation de la méthode de dimensionnement de la serre projet (Perrot, 2017)

#### 2.5.5. Hypothèses de scénarios pour les évaluations économiques

L'étude OPRA2 va durer dix-huit mois (cf. figure 27). Elle comprend un cycle hivernal et deux cycles estivaux. Le choix de l'espèce ou des espèces va conditionner la mise en place de scénarios. L'espèce, la taille initiale d'élevage, la durée du cycle et le type de marché seront des paramètres intéressants à comparer.

Plusieurs scénarios seront proposés puis comparés lors des évaluations économiques.

### 3. Résultats techniques

Les résultats techniques concernent tous les procédés d'amélioration du système durant la période de l'étude. L'unité de traitement de l'eau a été améliorée ainsi que l'isolation et l'aération de la serre. Des outils de lutte biologique ont été mis en place en constatant la prolifération de certains bio agresseurs.

#### 3.1. Traitement de l'eau

La présence d'un décanteur type « fecal trap » ne suffit pas à filtrer suffisamment l'eau de rejet des poissons. Le filtre biologique concentre régulièrement de la matière organique altérant ainsi ses capacités. Afin d'améliorer l'efficacité du système, il devenait urgent d'améliorer les performances de la filtration mécanique. Cette dernière est optimisée par un filtre à tambour en fonctionnement gravitaire de marque Oase (modèle ProfiClear Premium) qui est positionné juste avant le filtre multichambre (figure 20). Le tambour est constitué de douze grilles assurant une filtration à 60µm. Le filtre à tambour collecte la matière en suspension et effectue des auto-nettoyages à des intervalles approximatifs de quinze minutes utilisant alors 1,8L. d'eau. Ce filtre a quand généré quelques dysfonctionnements (cf. 4.1.3.2).



Figure 20 : photo du filtre tambour (smidap)

Les effets positifs sont immédiats évitant une concentration de matières organiques dans le filtre multichambre et permettant aussi de clarifier l'eau du circuit. Cependant, ce filtre a constitué dans un premier temps la principale perte d'eau du circuit en raison des eaux de lavage lors des nettoyages. Un système RFS (Radial Flow Settler), ou décanteur a donc été installé en début d'année 2017 afin de les récupérer.



Ainsi, ce décanteur limite les pertes en eau et permet également de récupérer de nombreuses MES riches en phosphate et en azote. C'est un cylindre conique, constitué de deux parties séparées par une planche horizontale percée au fond, qui permet de favoriser la décantation des boues au fond du cylindre et d'en faciliter la récupération. Ensuite, La partie liquide « propre » issue du filtre à tambour est redirigée vers le filtre biologique (figure 21).

Les boues d'évacuation ne sont pour l'instant pas traitées mais leur valorisation a fait l'objet d'un pré travail développé dans le paragraphe 6.3.

Figure 21 : Le système RFS connecté au filtre à tambour (smidap)

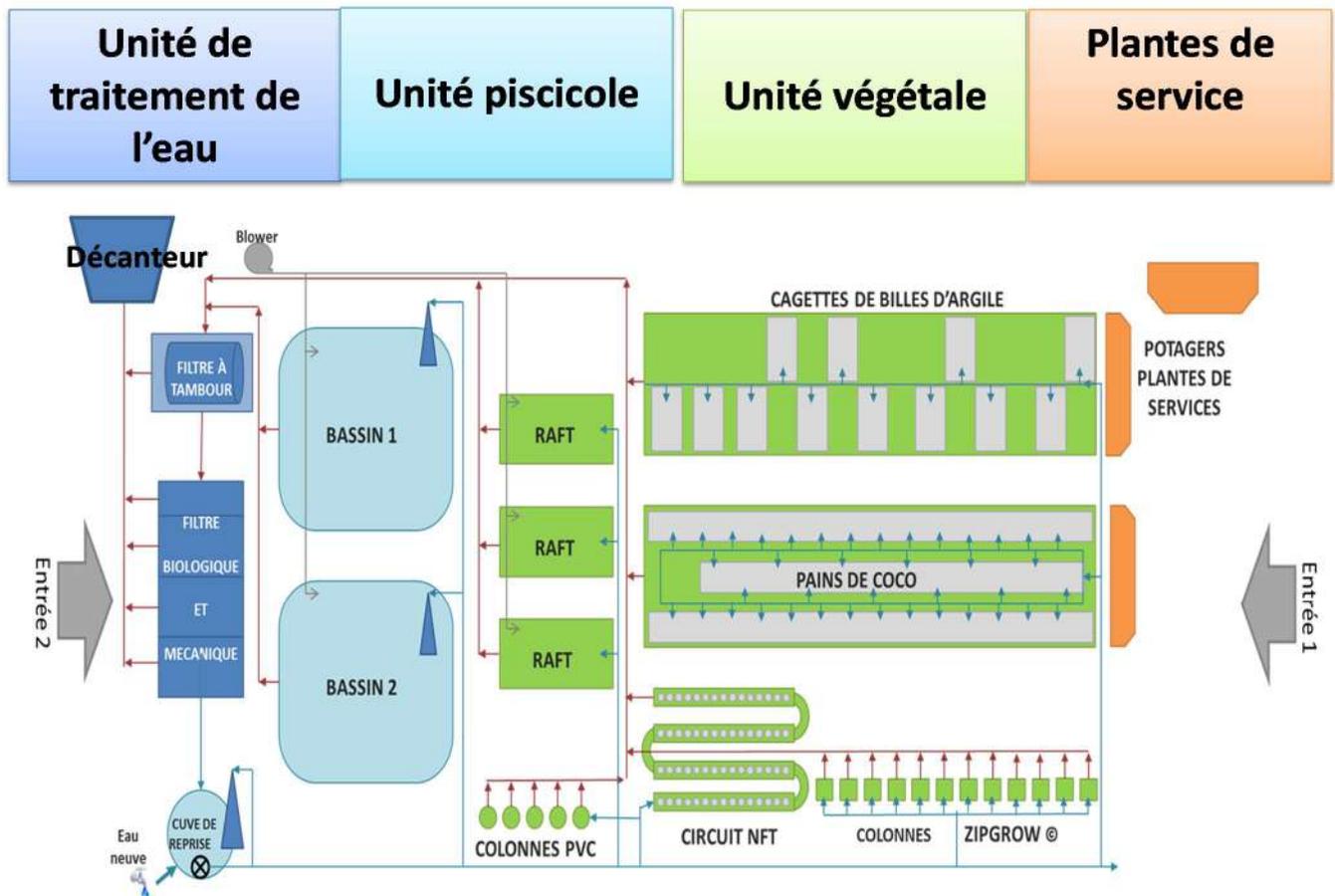


Figure 22 : schéma du pilote aquaponique OPRA2 optimisé (d'après Benoit, 2016 et Perrot, 2017)

### 3.2. Isolation et aération

Le pilote est constitué d'une serre tunnel simple en plastique. C'est du matériel d'occasion, le principe de l'étude étant d'avoir le minimum d'investissement (figure 23).

L'isolation est donc rudimentaire et même si l'installation permet d'avoir un minimum d'inertie thermique quand les températures extérieures restent douces, les variations thermiques peuvent être néanmoins très importantes. En période estivale, la température de l'air dépassant régulièrement les 45°C lors des journées ensoleillées assèche voire brûle les végétaux. Les températures élevées et la forte luminosité favorisent aussi l'évaporation et le développement des algues dans les bassins d'élevage et sur les systèmes de culture.



Figure 23 : aménagements isolation (smidap)

Plusieurs aménagements sont mis en place afin de limiter les effets de la chaleur et du rayonnement solaire (figure 23) :

- des filets ombragés à l'extérieur et à l'intérieur de la serre,
- une bâche opaque et isolante au-dessus des bassins de poissons limitant les trop grandes variations de température de l'eau des bassins. La différence de température de l'air est spectaculaire sous les bâches, souvent de 5°C à 10°C en moins,
- deux portes grillagées provisoires aux extrémités de la serre permettant une circulation de l'air continue du mois d'avril au mois d'octobre. Cette solution a permis aussi de faciliter l'accès de certains insectes « bénéfiques » notamment des pollinisateurs en début et fin de journée. Les actes de vandalisme ont aussi diminué (cf. 6.2.4).

Des portes « pleines » sont ensuite remises pendant la période hivernale.

Des solutions simples sont trouvées permettant de limiter les coûts tout en diminuant les pics de température dans la serre en période estivale et en gardant une luminosité suffisante les jours où le ciel est couvert.

A noter que la quantité importante d'eau déjà présente dans le système par rapport à une serre maraîchère ou horticole permet de diminuer les variations thermiques. Le rôle « tampon » de l'eau est un des axes qui pourrait être développé pour agir sur les variations thermiques dans la serre (cf. 6.2.4). Les températures moyennes estivales de l'eau mesurées dans la cuve de reprise étaient à 08h30 le matin respectivement de 19,2°C en 2016 et de 21°C en 2017 avec des variations journalières atteignant maximum 3°C (sauf une fois en mai 2017 avec un peu plus de 4°C). Cette variation pouvait atteindre les 8°C journalier avant les aménagements (Laviale, 2015).

### 3.3. Lutte biologique

La serre n'étant pas totalement isolée de l'extérieur, de nombreux insectes et autres animaux peuvent s'y introduire principalement entre les mois d'avril et d'octobre. Si la plupart de ces êtres vivants ne posent aucun souci aux végétaux voire ont un effet bénéfique, certains sont en revanche des bio-agresseurs en s'attaquant directement aux végétaux. Les cultures végétales sous serres subissent parfois des dégâts importants dus à des insectes ravageurs.

Dans le concept de l'aquaponie, il devient compliqué voire impossible d'utiliser des traitements dans un des compartiments aquaponiques sans impacter l'autre. Le peu de connaissances sur les impacts des traitements dans cette chaîne trophique complexe, nous a orientés vers une stratégie de lutte biologique, c'est-à-dire employant toutes les luttes sauf les traitements contre les ravageurs de cultures végétales.

Des plaques jaunes adhésives sont mises en place dans la serre, de nombreux ravageurs étant attirés par la couleur jaune. C'est une technique classique utilisée dans les serres maraîchères (figure 25).

Les premières stratégies en maraîchage ont consisté à substituer des traitements insecticides par des lâchers d'insectes prédateurs ou parasitoïdes. Toutefois, dans une serre avec une grande diversité de culture, il est possible de se retrouver confronter à une forte diversité de ravageurs. Parfois, il subsiste une absence d'auxiliaires vis à vis de certains ravageurs. Les connaissances concernant les interactions plantes/ravageurs/auxiliaires ont évolué, entraînant le développement de nouvelles méthodes alternatives. C'est ainsi que ce sont mis en place des nouveaux itinéraires techniques impliquant l'usage de plantes de service (définition ci-dessous et figure 24).

**Définition plantes de service :** « Plantes disposées avant ou pendant une culture, dans ou autour, et qui apportent un ou des avantage(s) à celle-ci. Celui-ci peut porter sur la qualité des sols ou le contrôle des bio-agresseurs (adventices, maladies ou ravageurs). Elle peut être détruite avant, pendant ou après la récolte. » Alain FERRE



Figure 24 : les diverses stratégies des plantes de services en Protection Biologique Intégrée (A. Ferre, com. pers.)

Ainsi, des potagers utilisant des plantes de services répondant à une stratégie en deux points conclue aux cours des discussions en groupe de travail sont mis en place dans la serre (figure 25).

Le premier point vise à bien orienter le choix des plantes à but commercial vers des espèces résistantes aux carences identifiées en aquaponie et résistantes aux ravageurs courants.

Le second point vise à assurer la santé sanitaire de l'ensemble de la serre en implantant des plantes de service pouvant être complétée par des lâchers d'auxiliaires. Les effets variés permises par les plantes de services peuvent être utilisés. Au milieu de la serre sont disposées des plantes-piège, telles que le fenouil *Foeniculum vulgare* pour capter les ravageurs du persil puis à l'entrée de la serre, des plantes nectarifères, des plantes-fleuries pour attirer et alimenter les auxiliaires adultes : la potentille (*Potentilla fruticosa* var. goldfinger), la fève (*Vicia faba* var. faba), les cosmos (*Cosmos bipinnatus*), la capucine (*Tropaelum majus*), le sedum (*Sedum* sp.), le groseillier (*Ribes rubrum*), le romarin (*Rosmarinus officinalis*), etc.



Figure 25 : plantes de service dans la serre (Perrot, 2017)



Figure 26 : photo de chrysope (www.servomendi.com)

Lorsqu'une présence importante de certains ravageurs avec apparition de symptômes sur les plantes apparaissent, des lâchers directs d'auxiliaires sont également effectués à proximité des cultures concernées. Les auxiliaires sont des êtres vivants qui détruisent les ravageurs ou atténuent leurs effets (Alim'agri, 2013). C'est en effet une stratégie de lutte biologique, comme par exemple le lâcher d'un acarien prédateur (*Amblyseius cucumeris*) pour se nourrir des thrips qui sont de petits insectes parasites ou encore de chrysopes (*Chrysoperla carnea*), connu comme insecte utile au potager, contre les pucerons (figure 26).

## 4. Résultats biologiques

Ce chapitre concerne tous les résultats de production piscicoles et végétaux obtenus depuis le début de l'année 2016 et jusqu'à la fin de l'été 2017.

### 4.1. Espèces piscicoles

#### 4.1.1. Sélection des espèces

A partir de la méthodologie décrite précédemment, il s'agit de choisir une espèce adaptée au cycle hivernal et une autre adaptée au cycle estival.

Le nombre d'espèces aquacoles élevées selon la FAO en 2012 était de cinq-cent-soixante-sept, dont trois-cent-cinquante-quatre espèces de poissons (FAO, 2014b). Dans les productions en aquaponie, de nombreuses espèces ont été testées (Foucard *et al.*, 2015). Lors de réunions en groupe de travail, des espèces sont « pré-choisies » en fonction de l'intérêt des producteurs locaux pour ces espèces, de l'intérêt évoqué dans la littérature en lien avec l'aquaponie et des critères technico-économiques énoncés précédemment (cf. 2.3). Douze espèces sont retenues et citées dans le tableau 7.

Un point important à souligner lorsqu'on envisage une diversification de l'aquaculture est le devenir du poisson et donc sa qualité en tant que produit fini s'il est destiné à la consommation humaine (Fauconneau, 2004) ou sa capacité à retrouver un comportement sauvage et ses facilités d'adaptation aux changements de milieu s'il est destiné au repeuplement (Rosenthal, 2011). Ce point peut avoir une importance déterminante dans les paramètres biologiques à considérer.

Dans le contexte régional et dans une approche économique, les cinq espèces les plus intéressantes sont la truite arc en ciel, le sandre, le black bass, la perche et les cyprins d'ornement type carpe koï (tableau 7).

Tableau 7 : classement technico-économique des espèces candidates pour la conduite du pilote OPRA (contexte régional)

Nom commun	Nom latin	Classement
Truite Arc en Ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	1
Sandre	<i>Sander lucioperca</i>	2
Black bass (à grande bouche)	<i>Micropterus salmoides</i>	3
Perche	<i>Perca fluviatilis</i>	4
Cyprins d'ornement	<i>Cyprinus sp.</i>	5
Silure	<i>Silurus glanis</i>	6
Ide	<i>Leuciscus idus</i>	7
Carpe commune	<i>Cyprinus carpio</i>	8
Esturgeon sibérien	<i>Acipenser baerii</i>	9
Amour Blanc	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	10
Tilapia	<i>Oreochromis niloticus</i>	11
Perche de Jade	<i>Scortum barcoo</i>	12

La truite Arc en Ciel et le sandre sont les espèces retenues respectivement pour le cycle hivernal et pour le cycle estival. Ces deux espèces présentent plusieurs intérêts : une demande locale soutenue, une haute valeur ajoutée et des marchés de tailles intermédiaires.

La truite Arc en Ciel est une espèce tout à fait adaptée à ce type de système en eau recirculée. Des fermes commerciales existent déjà, notamment au Danemark. Ses principales caractéristiques sont bien connues (tableau 8 et annexe 9). Une truite portion de 300g peut être obtenue en 7 mois à partir de truitelles de 20g (Dalsgaard *et al.*, 2013).

L'élevage de sandre en système RAS est plus récent. Quelques fermes commerciales existent dans le nord de l'Europe. C'est une espèce moins maîtrisée que la truite en élevage intensif mais des données existent (tableau 8 et annexe 11). C'est une espèce qui possède un fort potentiel de croissance si les températures sont maîtrisées. Par exemple, des sandres de 1 kg peuvent être produits en moins de 16 mois (Dalsgaard *et al.*, 2013).

Tableau 8 : paramètres observés dans des systèmes RAS selon les espèces (d'après Dalsgaard *et al.*, 2013)

Paramètres	T°C	O <sub>2</sub> (mg/l)	CO <sub>2</sub> (mg/l)	pH	TAN (mg/l)	NO <sub>2</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	IC
Truite TAC	5-21	6-8	≤15	6.5-8.0	<7.5	<1.00	<200	50-80	0,8-1,3
Sandre	17-25	6-8	10-20	6.5-7.5	0-10.0	0-1.50	≤56	15-60	1-1,3

Les cyprinidés d'ornement sont gardés aussi pour les phases de transition entre deux cycles mais ne seront pas pris en compte dans l'analyse économique.

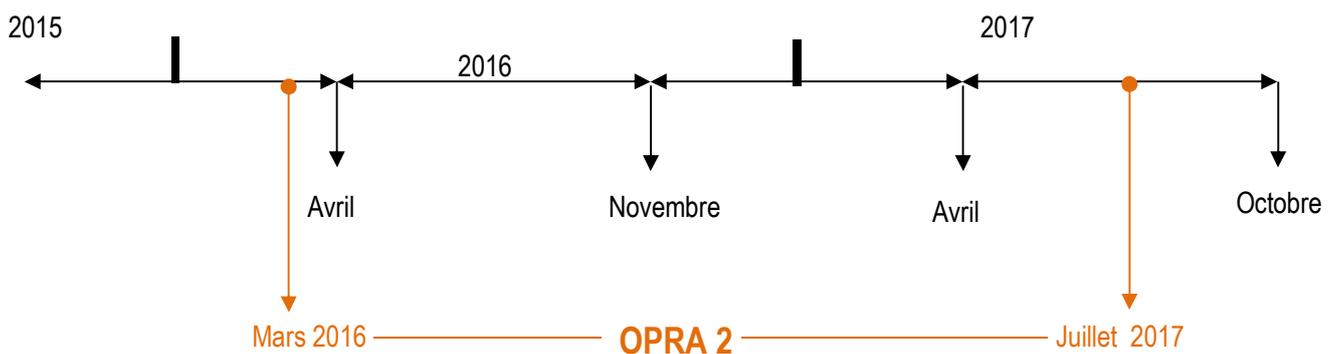


Figure 27 : calendrier OPRA 2

L'étude OPRA2 comprend deux cycles complets, un cycle estival 2016 et un cycle hivernal 2016-2017. Se rajoute une moitié de cycle estival 2017 permettant de confirmer ou d'infirmier les hypothèses émises en 2016 (figure 27). Certaines données du cycle hivernal 2015-2016, qui nous a permis de lancer les cycles d'OPRA2, sont traitées dans cette étude.

#### 4.1.2. Description des espèces

##### 4.1.2.1. Truites

80 truites arc en ciel (triploïdes) provenant d'une pisciculture située dans le nord de la Nouvelle Aquitaine sont introduites dans les deux bassins de la serre pilote le 25/11/2016 pour le cycle hivernal 2016-2017. Le poids moyen est d'environ 300 g, contrairement au cycle d'hiver de 2015-2016 où les truites avaient été introduites avec un poids moyen initial de 70 g.

#### 4.1.2.2. Sandres

600 alevins sevrés d'un poids moyen de 5 g en provenance de l'Université de Lorraine nous ont été livrés le 10/05/2016. Les poissons étaient à l'origine issus de pontes décalées de janvier 2016 réalisées en éclosérie privée. Une période d'acclimatation est instaurée pendant 30 jours dans une salle thermo régulée pour habituer les animaux à une température de 22°C, qui était la température attendue de l'eau du pilote aquaponique en journée. L'acclimatation a aussi concerné la luminosité car les premières périodes d'élevage ont été réalisées dans des salles obscures, le sandre étant surtout en début de cycle, un animal lucifuge. Des phases d'éclairage de faibles, moyennes puis de fortes intensités sont imposées progressivement pour habituer les sandres aux conditions de luminosité de la serre aquaponique.

Le 13 juin, pour le cycle estival 2016, 592 sandres sont transférés dans le pilote d'aquaponie avec un poids moyen de 10,4 g. A l'issue de ce cycle, une partie des sandres sont stockée en salle chaude (20-25°C) durant l'hiver 2016-2017. 130 sandres d'un poids moyen d'environ 300 g sont remis dans le pilote pour le cycle estival suivant 2017.

N.B. : Le dimensionnement en aquaponie se réalise par un ratio de la quantité d'aliment distribuée impliquant une surface de production végétale. Cependant, à l'état initial, la biomasse de sandres disponible (6,1 kg) est faible. Pendant quelques semaines, des poissons rouges sont mis en élevage dans un des bassins permettant ainsi une biomasse totale plus importante. Cette seconde espèce faisant office d'espèce de transition et n'étant pas la cible première de l'étude, son élevage ne sera pas détaillé dans la suite de ce rapport.

### 4.1.3. Résultats de production

#### 4.1.3.1. Cycle hivernal

##### *- Paramètres physico chimiques de l'eau*

Les paramètres physico chimiques sont mesurés de fin novembre 2016 à mai 2017 correspondant à la présence des truites.

L'amplitude entre les températures (de l'eau) pendant la phase d'élevage des truites arc en Ciel est très élevée, avec une température minimale de 1 °C et maximale de 20 °C et une température moyenne de 11.5 °C. Pendant la même période l'année précédente, la température minimale n'était jamais descendue en dessous de 7°C avec un maximum à 19°C et une moyenne d'environ 11,2°C (figure 28). Ces conditions ne sont pas vraiment optimales pour un élevage piscicole en circuit fermé où la température est habituellement contrôlée. Cependant, la truite est une espèce qui s'adapte facilement aux fortes amplitudes thermique (5-18°C), donc sa croissance sera moins affectée par ces variations de températures que d'autres espèces. Ces changements thermiques, parfois rapides et sur de faibles durées (pics de températures), nécessitent un suivi du cheptel rigoureux afin de réagir rapidement en cas de fortes baisses de disponibilité en oxygène.

Cela a été le cas en fin d'élevage notamment en mai 2017, où la température a subi des variations de 4-5°C en une journée, sur des températures élevées (jusqu'à 20°C) conduisant à une mortalité plus importante par rapport au reste de l'élevage. (5% contre 2% sur les autres périodes) (annexe 8).

Concernant le pH, la valeur moyenne obtenue pendant la période est de 6,6 avec un maximum de 7,8 et minimum de 5,3. Pendant l'hiver 2015-2016, cette valeur moyenne était de 7 avec un minimum à 6,1 et un maximum à 8,1 (tableau 9). Une seule valeur mesurée est inférieure à 6. La baisse du pH à partir du mois de mars coïncide avec l'augmentation significative de la température de l'eau (>12°C), le développement végétal et la dureté de l'eau (cf. 4.1.3.2). Ces chutes parfois brutales de pH sont plus sensibles pendant le cycle estival (figure 28).

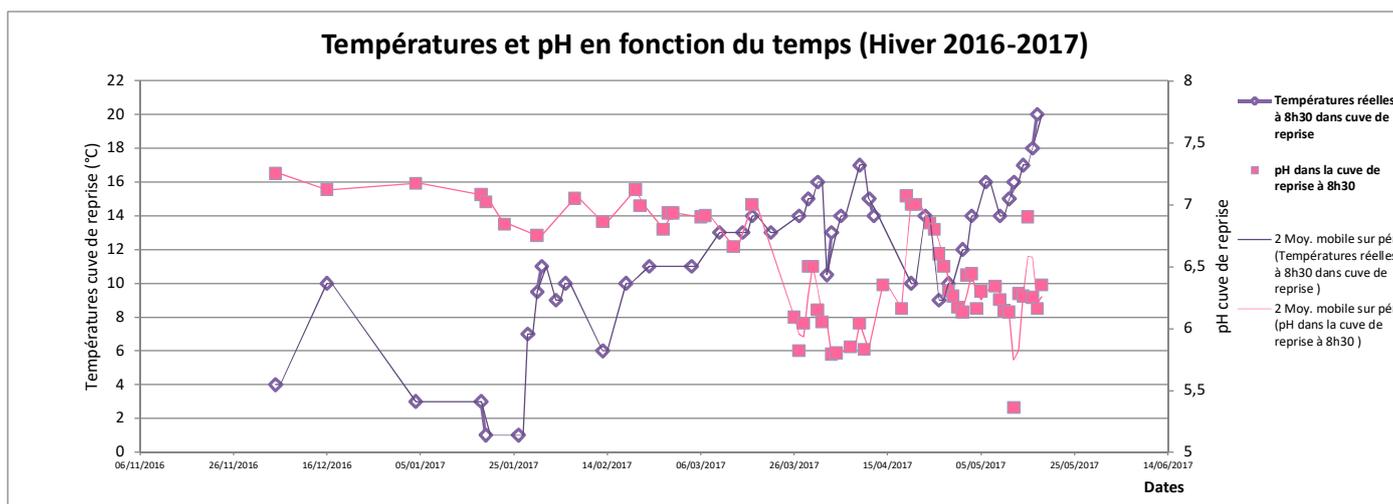


Figure 28 : évolution des températures et du pH de l'eau du pilote hivernal 2016-2017 (Perrot, 2017)

Le pH optimum pour le système se situe autour de 7. C'est un compromis entre le fonctionnement du filtre biologique optimisé avec des pH basiques (7,5-8,5) et l'assimilation des nutriments par les plantes qui a un meilleur rendement à pH acide (entre 5 et 6,5). Cependant, l'élément le plus sensible aux variations de pH est le filtre biologique avec les populations bactériennes nitrifiantes. Une trop forte acidité peut entraîner une détérioration de la nitrification et engendrer une accumulation d'azote ammoniacal et nitrites dans le système, toxiques pour les poissons.

Tableau 9 : températures et pH de l'eau lors des cycles hivernaux 2015-2016 et 2016-2017

	Moyen	Max	Min
<b>Température °C</b>			
2015-2016	11,2	19	7
2016-2017	11,5	20	1
<b>pH</b>			
2015-2016	7	8,1	6,1
2016-2017	6,6	7,8	5,3

Le pH est resté globalement constant, excepté en fin de période où il s'acidifiait rapidement. Dans ce cas des corrections sont effectuées progressivement avec du bicarbonate de potassium afin de tamponner le pH.

Les moyennes des autres paramètres physico chimiques suivis à la sortie poisson et au niveau de la cuve de reprise lors de la période d'élevage des TAC montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les résultats de ces deux points de prélèvements (tableau 10). Les valeurs d'oxygène sont très satisfaisantes pour l'espèce concernée. Les teneurs en nitrates (N-NO<sub>3</sub>), en nitrites (N-NO<sub>2</sub>) et en potassium sont plutôt faibles (K<sup>+</sup>). Ces résultats sont certainement liés à une densité d'élevage faible (13.3 kg/m<sup>3</sup> au final) par rapport à des élevages en circuit fermé dont les densités peuvent aller jusqu'à 25 kg/m<sup>3</sup> en élevage biologique et jusqu'à 100 kg/m<sup>3</sup> en conventionnel. Néanmoins, comme notre système n'est pas sécurisé, le

choix de baisser les densités d'élevage a été pris pour limiter les risques en cas de panne de matériel, ou en cas de conditions environnementales extrêmes et risquées pour l'élevage (O<sub>2</sub>, pH, T°).

A noter aussi un taux de renouvellement en eau du système faible et maîtrisé à l'inverse de l'été 2016 (cf. 4.1.3.2) soit environ 400 L./kg d'aliment.

Tableau 10 : moyenne des résultats des analyses d'eau du cycle hiver 2016-2017

	Sortie Poissons (mg/L)	Cuve de reprise (mg/L)
<b>TAN</b>	0,5	0,47
<b>N-NO2</b>	0,04	0,04
<b>N-NO3</b>	17,51	17,11
<b>PO43-</b>	7,88	7,95
<b>K+</b>	10,09	10,09
<b>Fe</b>	0,95	0,94
<b>Ec (mS/cm)</b>	0,66	0,65
<b>pH</b>	6,76	6,86
<b>O2</b>	8,98	9,69
<b>T (°C)</b>	11,55	11,55
<b>TH</b>	19,36	19,09

#### *- Performances d'élevage*

Les paramètres et les résultats de l'élevage des truites pendant l'hiver 2016-2017 sont présentés en détails en annexe 8.

Le poids moyen des TAC évolue entre 300 et 900 grammes (figure 29 et tableau 11). Trois périodes d'élevages sont distinguées.

Une première période de croissance, qui va jusqu'à la fin janvier, est mesurée avec des animaux atteignant les 450g de poids moyens au bout de 2 mois soit 49% de croissance pondérale. Une deuxième période est constatée allant jusqu'à la fin mars avec des températures croissantes se rapprochant de l'optimum pour cette espèce aboutit à des animaux avec des poids moyens de 761g, soit un taux de croissance de 1%/ jour (69% de croissance pondérales). Ensuite cette croissance ralentit fortement, soit 18% de croissance pondérale, certainement en lien avec les nombreux pics de température pendant cette période (jusqu'à 25 °C en milieu de journée) et la limitation de l'alimentation. Il faudra environ 2,5 fois plus de temps pour obtenir des truites de 900 grammes par rapport à un circuit recirculé fermé à 16 °C. Ainsi, même si la qualité d'eau n'est pas optimale, les résultats restent proches des résultats théoriques avec un IC de 1.2 (figure 29).

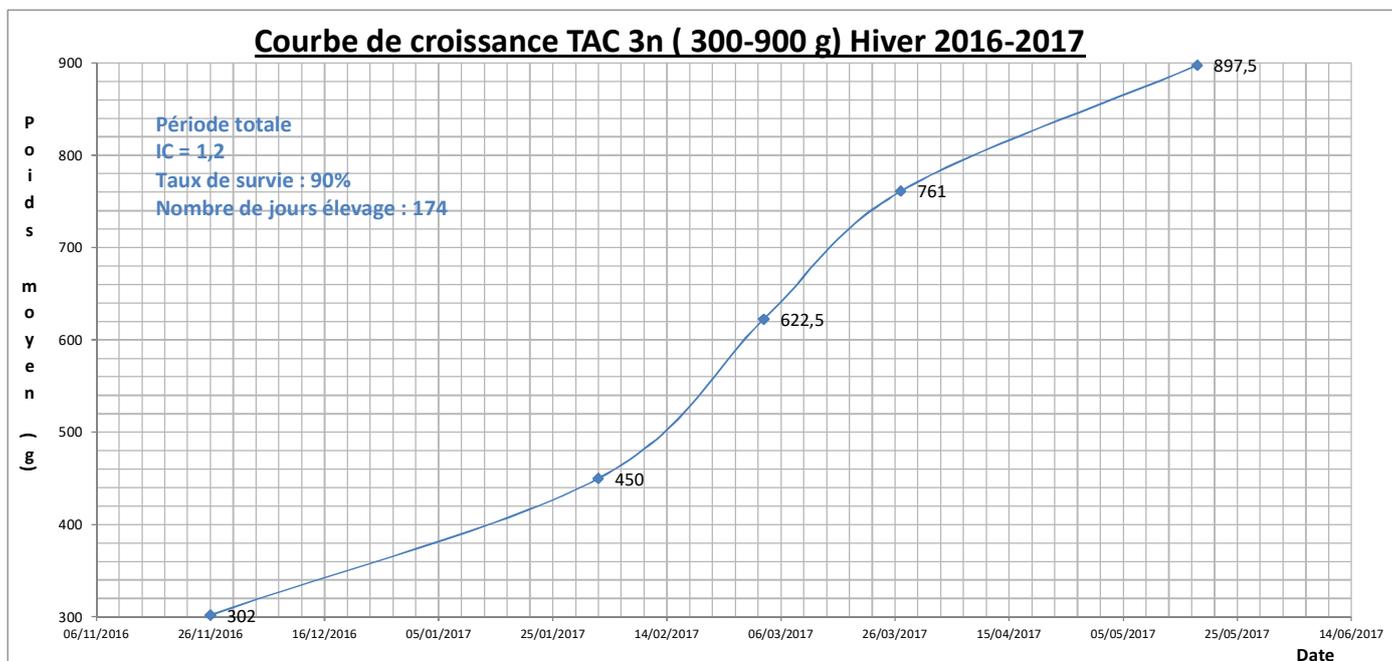


Figure 29 : courbe de croissance TAC 3n Hiver 16-17 (Perrot, 2017)

Tableau 11 : résultats zootechniques de l'élevage des TAC en aquaponie durant le cycle hiver 2016-2017

Durée d'élevage	Poids moyen initial	Densité initiale	Taux de survie	Densité finale	Poids moyen final
174 jours	302 g	4,8 kg/ m <sup>3</sup>	91 %	13.1kg/ m <sup>3</sup>	897 g



Figure 30 : truite de plus de 900 g en mai 2017 (Garsi P.)

En comparant avec les performances des TAC de l'hiver 2015-2016 (figure 30), les petites truites présentent un meilleur taux de croissance en général, avec des températures à peu près similaires sur les deux années d'élevage, menant à un gain de biomasse beaucoup plus important chez les petites truites, ce qui est souvent le cas chez les espèces piscicoles. Les truitelles d'un poids moyen de 70g sont mis dans le système en novembre 2015 (figure 31). Deux récoltes avec vente des poissons sont réalisées, la première le 11 mars 2016 avec un poids moyen dépassant les 300g (figure 32), la deuxième le 19 avril 2016 avec un poids moyen de 500g. Les dernières truites sont enlevées du système en mai 2016 en raison de températures élevées. Le poids moyen mesurés était alors de plus de 600g (figure 30). Tous les paramètres d'élevage des truites sont mentionnés à l'annexe 8.

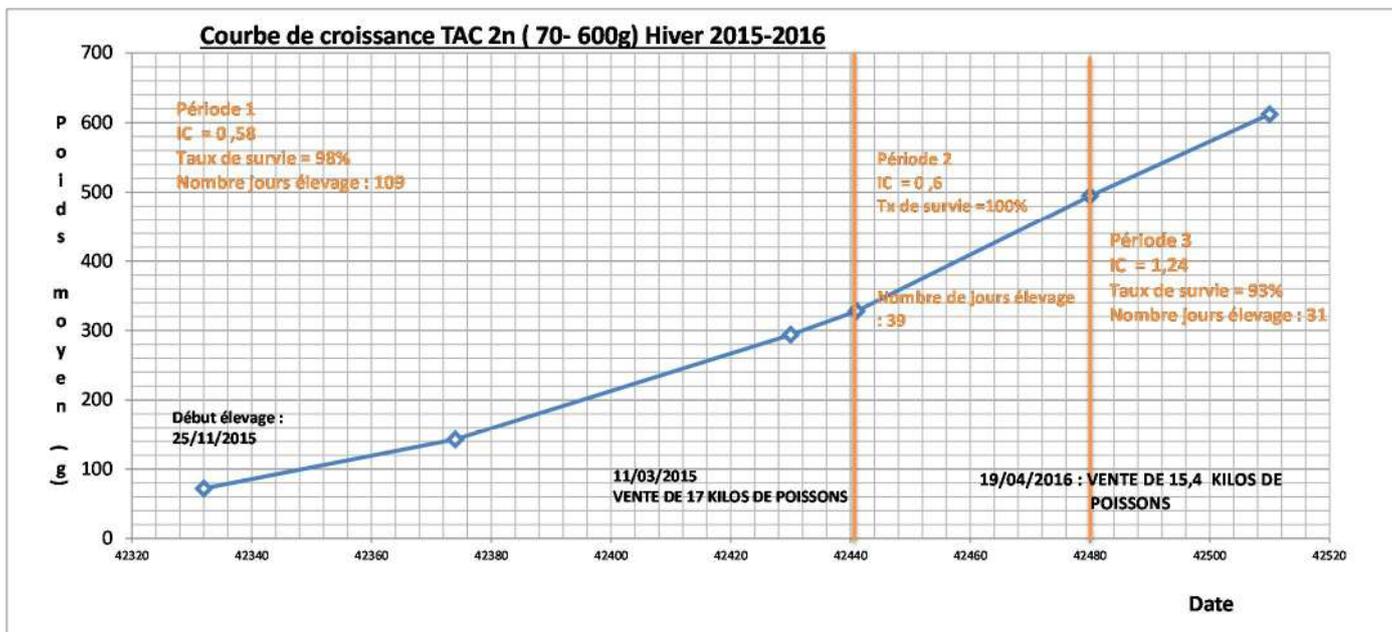


Figure 31 : courbe de croissance d'après les résultats zootechniques des TAC 2n hiver 15-16 (Perrot, 2017)



Figure 32 : truite d'un peu plus de 300 g vendue le 11/03/2016 (Garsi P.)

Concernant la conduite d'élevage, les petits poissons ont, en général, une demande en oxygène beaucoup plus élevée que les gros, impliquant un suivi beaucoup plus rigoureux. En pratique, élever des petits individus demande de réaliser des échantillonnages de tailles et de poids de manière plus régulière en raison des fortes croissances et du risque d'hétérogénéité de taille. Il faudra également beaucoup plus d'individus par bac pour atteindre la même biomasse qu'avec les grosses truites. Enfin, même si nos résultats expérimentaux ne le démontrent pas, les petites truites sont en général plus fragiles, plus sensibles au stress, aux risques pathologiques et donc à la mortalité en général.

#### 4.1.3.2. Cycle estival

Contrairement aux truites, l'élevage du sandre est beaucoup moins bien connu et maîtrisé, notamment en hors sol et en circuits fermés, menant à des incertitudes concernant l'optimisation des paramètres d'élevage.

Deux cycles estivaux sont lancés. Le premier, pendant l'été 2016, a débuté avec des alevins de 10 g de poids moyens. Le second cycle a débuté avec une partie des sandres du premier cycle stockée en hiver en salle chaude. L'objectif est de vérifier l'intérêt technico économique des deux cycles, soit de partir de l'alevin soit de partir d'animaux déjà pré grossis.

Le deuxième cycle a été perturbé car un souci technique extérieur au pilote a mené à la perte de l'ensemble de nos individus le 02/07/2017, montrant l'extrême nécessité d'installer un système de sécurité (alarmes, capteurs ...) afin d'éviter ce genre d'accident. En effet, une disjonction électrique d'une prise dans les serres horticoles voisines du pilote a provoqué la panne de l'ensemble du matériel électrique du site et donc de la serre.

Les paramètres physico chimiques sont mesurés à partir de la mi-juin jusqu'en octobre 2016 pour le premier cycle estival suivi. Pour le deuxième en 2017, les mesures sont réalisées entre la mi-mai et la fin juillet.

En 2016, les paramètres de production sont détaillés dans l'annexe 10. Les températures (figure 28) sont nettement inférieures à celles attendues pour la période. La température moyenne de l'eau relevée le matin est de 19,2°C +/- 1,8. L'amplitude thermique dans la journée n'a pas toujours été mesurée tout au long de l'étude. Des observations sur cinq jours ont montré une variation autour de 3°C. Cependant, ces observations sont très dépendantes de l'ensoleillement et du climat. La valeur de température optimale de croissance pour le sandre est de [23-25] °C (Kestemont *et al.*, 2015). Les mesures se placent donc en dessous des températures de croissances optimales, ce qui pourrait justifier des croissances inférieures à celles espérées ou du moins à celles pouvant être atteintes dans un système thermo-régulé. Deux pics d'élévation des températures sont constatés sur la période (le 23/06 et le 19/07). Ces deux données ont impliqué un suivi particulier de l'élevage en s'assurant de la bonne oxygénation du système, ce qui aura une influence sur la ration alimentaire distribuée.

En 2017 et contrairement à l'année précédente, les températures sont très élevées dès le début juin (tableau 12) avec des valeurs pouvant atteindre les 25°C en après-midi, très favorables pour la conduite d'un élevage de sandres.

Comme pour les truites, le pH est quasi-neutre afin de satisfaire les deux productions. Cependant, en 2016 début août, une chute brutale du pH est constatée avec une valeur descendue à 4,9. Les poissons ont été stressés mais aucune perte n'a été constatée. L'alimentation a été arrêtée pendant plusieurs jours. Ce même phénomène s'était produit en juin 2015. Le pH est remonté en augmentant le degré d'ouverture du système, en rajoutant des carbonates et en déposant dans la cuve de reprises des coquilles d'huîtres riches en carbonates de calcium. Cette chute du pH est liée à l'augmentation de la biomasse végétale. Cette variation est d'autant plus importante que la dureté de l'eau est faible, ce qui est le cas à Guérande. Il faut donc tamponner le milieu pour limiter ce phénomène. Attention à bien prendre en compte la dureté de l'eau d'approvisionnement pour toute installation d'une unité aquaponique à vocation commerciale.

Tableau 12 : températures et pH de l'eau lors des cycles estivaux 2016 et 2017

	Moyen	Max	Min
<b>Température °C</b>			
2016	19,2	22	16
2017	19,6	25	16
<b>pH</b>			
2016	7,2	7,67	4,9
2017	7,12	7,6	6,3

Des analyses d'eau complémentaires sont effectuées (tableau 13). Il n'y a pas de différences significatives entre les deux points de prélèvements. Comme pour le cycle hivernal, l'électroconductivité est faible. Ces faibles valeurs d'EC constatées lors du premier cycle OPRA en 2016 (0,65) sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en 2017. En 2016, le nouveau filtre à tambour a connu des dysfonctionnements. Il avait tendance à s'auto nettoyer régulièrement. Comme initialement l'eau de nettoyage n'était pas récupérée, le renouvellement de l'eau était assez important. Les apports d'eau neuve était d'au moins 1m<sup>3</sup>/ kg d'aliment. Le dysfonctionnement a été en partie corrigé en 2017 avec une valeur de renouvellement proche de 400 à 500 L./kg d'aliment, ce qui n'a pas eu d'incidence sur les valeurs moyennes d'EC. C'est un constat partagé par les expérimentations menées dans les sites pilotes d'APIVA avec des EC moyennes inférieures à 1 (cf. 4.2.3.1).

Les taux de certains éléments comme le phosphate ou le potassium sont aussi faibles. La courte durée d'élevage en 2017 explique en partie ces résultats.

Tableau 13 : moyennes des résultats des analyses d'eau cycle été 2017(cuve de reprise)

	Sortie Poissons (mg/L)	Cuve de reprise (mg/L)
TAN	1,10	0,95
N-NO2	0,02	0,00
N-NO3	12,87	12,93
PO43-	3,03	2,63
K+	3,67	3,67
Fe	0,92	0,94
Ec (mS/cm)	0,64	0,64
pH	6,84	6,84
O2	6,99	7,53
T(°C)	21,00	21,00
TH	18,00	17,33

- Performances d'élevage

La croissance est représentée par les poids moyens (figure 34 et 36). Lors du cycle estival de 2016, les poids moyens sont passés de 13 g à 50 g au bout 164 jours d'élevage Figure 35 : mesures de paramètres de croissance des jeunes sandres par des élèves (smidap) Un arrêt de croissance est intervenu début août suite à une chute de pH (4,9) qui a entraîné un stress des poissons et un arrêt provisoire de leur alimentation. Malgré l'absence de mortalités associées, les prises alimentaires ont été perturbées un certain temps et en parallèle les températures moyennes de l'eau n'ont plus dépassées les 20-22°C à partir de la fin août pour descendre en dessous de 15°C dès le mois d'octobre.

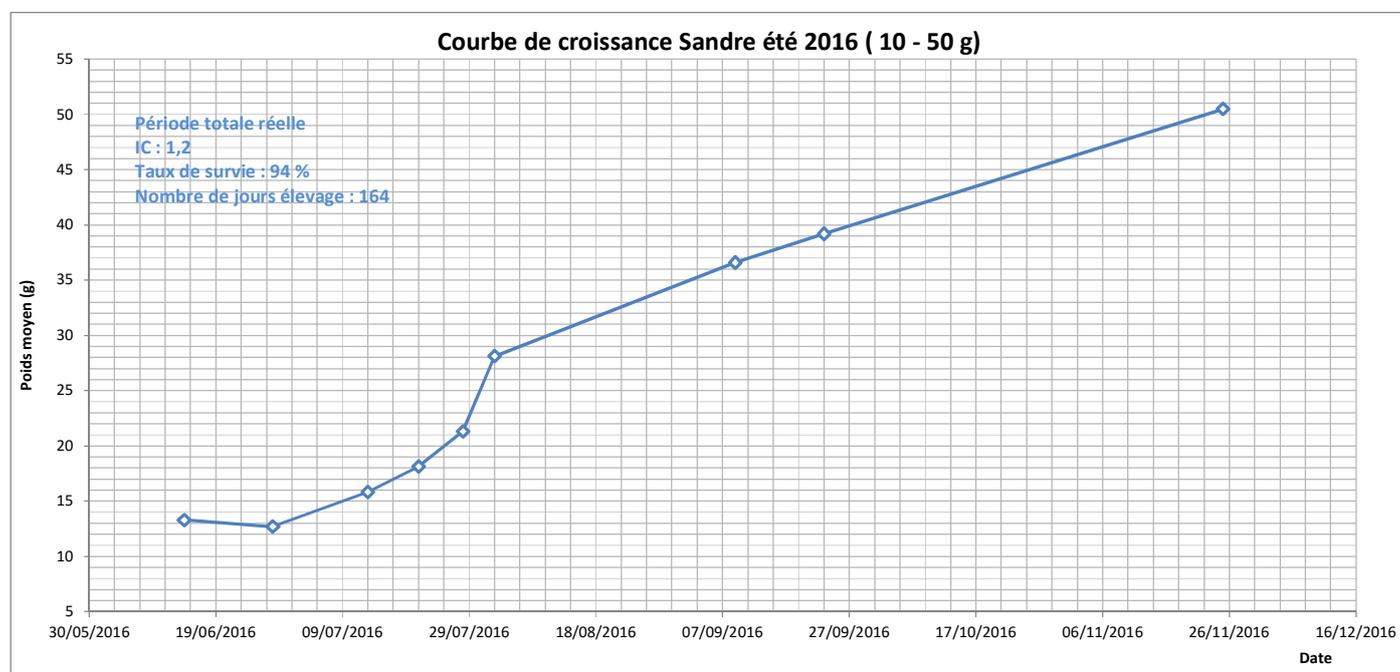


Figure 33 : courbe de croissance des sandres pendant le cycle estival 2016 (Perrot, 2017)

Le peu de références disponibles sur la production de sandre en hors sol nous a contraint à rester très prudent pendant tout le cycle d'élevage. Par exemple, les densités sont toujours restées faibles avec une charge initiale d'un peu plus de 3 kg/m<sup>3</sup> pour finir avec une densité finale de 11 kg/m<sup>3</sup>. Les taux de croissance obtenus sont faibles et peuvent être comparés aux valeurs mesurées en pisciculture en étang. Les raisons de cette faible croissance concernent d'une part, la faiblesse des températures moyennes et d'autre part, la forte chute de pH mesurée début août qui est à l'origine d'un blocage de croissance de plus de deux semaines (annexe 12)



Figure 34 : photo des alevins de sandres introduit dans le pilote (smidap)

Concernant l'alimentation, la ration distribuée n'est pas significativement différente de celle théorique, ce qui nous amène à dire que lors d'un élevage de sandre en circuit aquaponique, les pisciculteurs peuvent se baser sur la ration théorique pour évaluer les coûts de production globaux.

L'un des grands points positifs de cette expérimentation concerne le taux de survie qui est de plus de 93%, malgré les différents aléas (annexe10). C'est un résultat remarquable pour cette espèce. En effet, le sandre est une espèce très sujette au cannibalisme (Zakêœ, 2012a). Dans la littérature le cannibalisme peut être responsable jusqu'à 40% des mortalités chez les percidés (Zakêœ, 2012b).

Même si l'effet cannibalisme n'a pas été évalué, les 7% de pertes peuvent s'expliquer en partie par ce phénomène qui a essentiellement concerné le début d'élevage car à j75, les mortalités cumulées étaient estimées à plus de 5%.



Figure 35 : mesures de paramètres de croissance des jeunes sandres par des élèves (smidap)

Une évaluation de l'hétérogénéité de poids a montré qu'elle augmente puis reste régulière tout au long de l'élevage. L'hétérogénéité moyenne mesurée est de 25,3%, ce qui est plutôt correct pour cette espèce. En moyenne, l'hétérogénéité en élevage piscicole est de 30%, chez un autre percidé, la perche (*Perca fluviatilis*), les valeurs trouvées sont de 37,7 à 54,1 % (Campeas, 2008).

Concernant le cycle estival 2017, une disjonction électrique sur tout le site le 02 juillet 2017 a provoqué la mort du cheptel de sandres présent dans le pilote. Un deuxième lot de sandres gardé en réserve a permis de maintenir l'expérimentation (figure 36).

L'accident technique a permis de prélever seulement deux poids moyen sur le mois d'élevage, ce qui est très peu pour établir une courbe de croissance.

Pendant ce mois, les sandres ont montré de bonnes performances (annexe 10), favorisées par une bonne adaptation au système des individus (pas de signes de stress) et à des conditions de températures optimales pour leur élevage permettant d'obtenir de bons résultats de croissance. (Taux de croissance/ jour à 1.1, et IC de 0.4). Les poids moyens sont passés de 285g à 397g en 1 mois (figure 35).

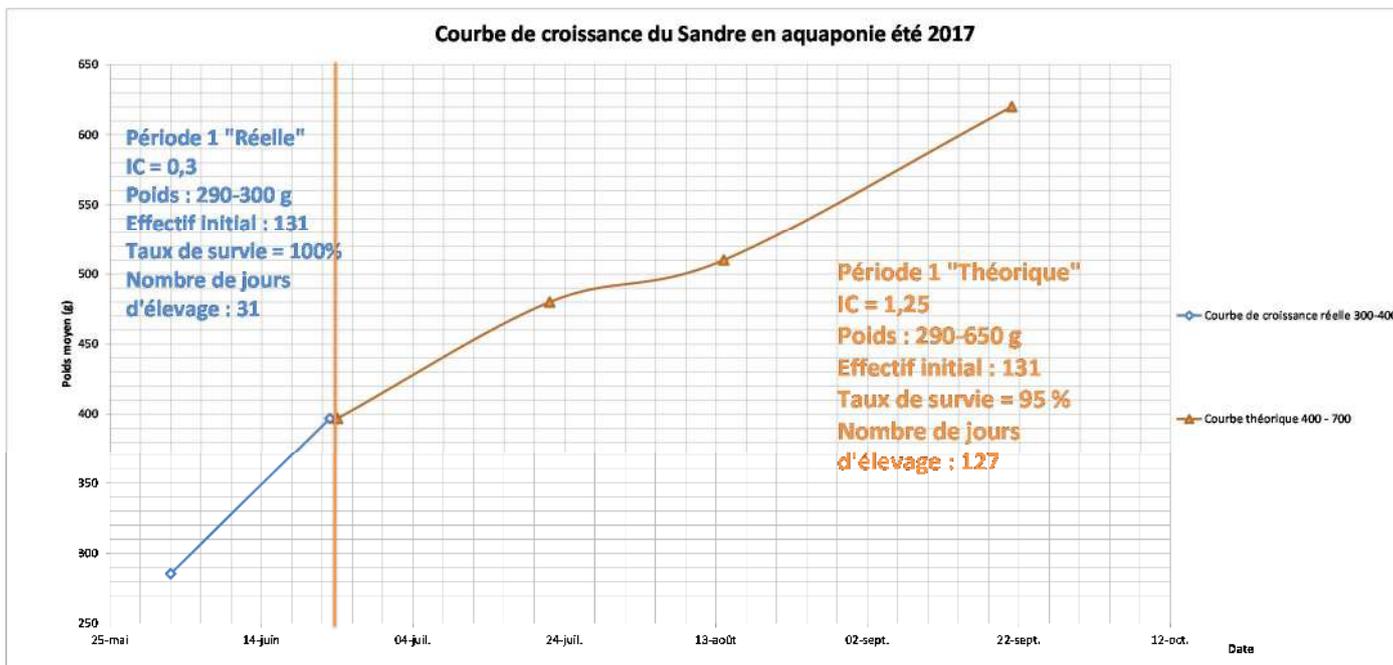


Figure 36 : courbe de croissance du sandre aquaponie été 2017 (Perrot, 2017)

A partir d'une courbe théorique de sandres à 22°C (annexe 11), une évolution de la croissance est estimée en utilisant le paramètre des degrés jours à partir des moyennes de températures mensuelles en 2016 et 2017. L'objectif est de sortir les sandres du système en octobre 2017. Il restait 97 jours d'élevage à partir du 02 juillet soit environ 1758°C jours cumulés d'après nos températures réelles. Théoriquement, à partir des individus de 400g, les sandres auraient pu sortir le 1<sup>er</sup> octobre avec un poids moyen de 650g (figure 36, 37 et tableau 14).



Figure 37 : photo d'un sandre de 300g (smidap)

A partir de nos données et des données théoriques à disposition, un itinéraire technique pour les sandres de 285 g en aquaponie peut-être proposé. Tous les paramètres d'élevage des sandres sont mentionnés en annexe 10.

Tableau 14 : itinéraire technique du sandre en aquaponie selon nos résultats réels et théoriques.

Durée d'élevage	Poids moyen initial	Densité initiale	Taux de survie	Densité finale	Poids moyen final
127 jours	285 g	7.5 kg/ m <sup>3</sup>	95 %	16.5 kg/ m <sup>3</sup>	650 g

Même s'il faut rester prudent avec cette estimation, ces premiers résultats encourageants semblent être partiellement validés par les données récoltées à partir de notre lot de réserve introduit dans le pilote à la suite de l'accident technique. Ce lot correspondait à des « queues de lot » avec de fortes hétérogénéités de poids pour un poids moyen de 290g. Les résultats mesurés le 06 octobre 2017 ont montré une forte hétérogénéité de poids allant de 160g à 800g. Le poids moyen était de 485g. Ce résultat vient conforter la courbe de croissance théorique calculée auparavant (Figure 38 : photo d'un sandre de 600 g en novembre 2017 venant de la serre aquaponique (smidap)).

Les différences de conduite d'élevage entre les sandres de 70 et de 200 g sont les mêmes que ceux avancés pour les truites dans le paragraphe précédent. Cependant, au cours de nos différentes phases d'expérimentation, les petits sandres ont montré des comportements de cannibalisme plus importants que les gros sandres avec une sensibilité plus grande au stress. Etant beaucoup plus sensibles à la lumière, il est nécessaire pour un élevage de petit calibre de couvrir les bassins afin de baisser l'intensité lumineuse.



Figure 38 : photo d'un sandre de 600 g en novembre 2017 venant de la serre aquaponique (smidap)

#### 4.1.3.2. Suivi sanitaire chez les poissons

Le suivi sanitaire des poissons a consisté à contrôler quotidiennement le comportement des animaux, les mortalités et les signes de parasitisme, de cannibalisme voire de malformation. Après plus de dix-huit mois d'élevage, très peu de mortalités ont été constatés et les animaux « semblaient » en très bonne santé. Seule, l'apparition de tâches cotonneuses et blanchâtres (saprolégniose?) ont été vues sur des truites lorsque l'eau dépassait les 20°C, sans conséquences pour les poissons en mettant en place certaines bonnes pratiques.

A noter pour toute unité aquaponique commerciale certaines obligations réglementaires sur le sanitaire avec l'Agrément ZooSanitaire ou AZS (cf. 6.4.1) qui comprend notamment l'obligation de tenir un registre d'élevage qui doit contenir toutes les entrées et les sorties de poissons de l'unité ainsi que les mortalités dites anormales.

## 4.2. Espèces végétales

### 4.2.1. Choix des espèces et des supports

À l'issue de la veille bibliographique (Rackocy *et al.*, 2006 ; Afsharipoor & Roosta, 2010, love 2014; Foucard *et al.*, 2015 ; Gangenes Skar *et al.*, 2015), des discussions entre les différents partenaires du projets (groupe de travail OPRA et CTIFL) et des précédentes expériences réalisées sur le pilote, un choix d'espèces végétales a été réalisé.

Les études sur les systèmes d'aquaponie indiquent un grand nombre d'espèces disponibles (Rackocy *et al.*, 2006 ; (Love *et al.*, 2014 ; Foucard *et al.*, 2015) avec une dominance des plantes « feuilles » (salades, herbes aromatiques). Le premier critère qui s'applique est celui de la rentabilité économique. Des plantes à fortes valeurs ajoutées sont donc ciblées. Dans un premier temps, la potentialité de produire des plantes médicinales est explorée. Cependant, la conservation des propriétés des plantes ne pouvait pas être vérifiée, ce qui ne permettait pas d'assurer la valorisation de la production. En effet, les substances caractérisant ces espèces peuvent être produites en quantités importantes dans le cadre de systèmes hydroponiques ou aéroponiques (Chandra *et al.*, 2014) mais il n'existe pas de références en aquaponie. Il n'est donc pas certain qu'un système tel que le nôtre puisse produire des plantes aux « vertus médicinales » ni que ces substances soient produites de façon continue. Le choix s'est donc orienté, en fonction du cycle saisonnier, vers des plantes feuilles dont certaines aromatiques et des plantes fruits pouvant présenter aussi une forte valeur ajoutée.

#### 4.2.1.1. Cycle hivernal

Pendant cette saison, un seul véritable suivi sur les plantes a été réalisé pendant l'hiver 2016-2017 (figure 27). Le choix, plus limité que pour la période estival, s'est porté sur le poireau (*Allium porrum*), les épinards (*Spinacia oleracea*), le cresson (*Nasturtium officinale*), la ciboulette (*Allium schoenoprasum*), les poirées (*Beta vulgaris*), les radis (*Raphanus sativus*), les navets (*Brassica rapa*), les choux du genre *Brassica* avec le chou feuille, le chou frisé ou le chou-fleur et enfin différentes salades (*Lactuca s.*).

Les supports et les densités associées sont définis en comité technique et synthétisés dans le tableau 15 ci-dessous.

Tableau 15 : espèces végétales cultivées et leurs supports pendant le cycle hiver OPRA2 (Perrot, 2017)

Supports	Espèces	Densité (nombre/unité de surface)	Nombre total de plants	Date de mise en culture
Pain de Coco	Chou feuille	2/ml	6	02/02/2017
	Chou-Fleur	2/ml	6	02/02/2017
	Chou-Frisé	2/ml	6	02/02/2017
	Ciboulette	10/ml	70	02/02/2017
RAFT	Salades	25/m <sup>2</sup>	150	08/12/2016
Perlite	Radis	140/m <sup>2</sup>	50	08/12/2016
	Navet	140/m <sup>2</sup>	40	08/12/2016
ZipGrow	Poirée	39/m <sup>2</sup>	36	07/02/2016
Tapis de Coco	Cresson	Semis	4.2 m <sup>2</sup>	13/03/2017
Billes d'argile	Poireau	33/m <sup>2</sup>	84	07/10/2016
	Epinards	16/m <sup>2</sup>	24	07/10/2016

#### 4.2.1.2. Cycle estival

L'étude OPRA2 comprend deux cycles estivaux anticipant le rôle prépondérant de cette période sur le chiffre d'affaires annuel d'une unité d'aquaponie. Le premier cycle estival de l'étude en 2016 a permis de tester différentes espèces avec pour certaines d'entre elles plusieurs variétés ainsi que la meilleure adéquation espèce-support. D'autres tests sont réalisés pendant l'été 2017 afin de valider certains choix nécessaires pour l'analyse technico économique (tableau 16).

Connaissant les plantes maîtrisées en aquaponie (Foucard *et al.*, 2015), le choix s'est porté sur le persil (*Petroselinum sativum*), le basilic (*Ocimum basilicum*) avec trois variétés « grand vert, pourpré et grec », la ciboulette (*Allium schoenoprasum*), la menthe (*Mentha sp*) avec 4 variétés poivrés, « chocolat, marocaine et basilic », le coriandre (*Coriandrum sativum*), l'aneth (*Anethum graveolens*), et plusieurs variétés de salades (*Lactuca s.*).

Les discussions et les critères de besoins des plantes (Afsharipoor & Roosta, 2010 ; Serge Le Quillec, com. pers.) nous ont aussi dirigés vers le choix de plantes à petits fruits telles que les fraisiers avec deux variétés (*Fragaria sp*), la «Charlotte » et la « Mara des bois » sur plusieurs supports. Ces deux variétés correspondent aux variétés les plus performantes testées en 2016 (cf 4.2.3.4). Ce sont des variétés dites « remontantes » c'est-à-dire « avec plusieurs périodes de production dans l'année ». Ce choix s'avère nécessaire dans le but de maximiser la productivité du système et d'obtenir une récolte continue.

Plusieurs variétés de tomates (*Solanum lycopersicum*) sont testées en 2016 (cf. 4.2.3.4). Seules, deux variétés de tomates cerises et de tomates grappes rouges avec la Principe Borghese et jaunes avec la Golden Cherry sont retenues pour les essais 2017 suite aux résultats de 2016.

Une autre variété de plante fruit a été testée en 2016, le framboisier (*Rubus idaeus*) mais une seule récolte avait été effectuée alors.

Tableau 16 : espèces végétales cultivées et leurs supports pendant le cycle été 2017 OPRA2 (Perrot, 2017)

Support	Espèce	Densité (nombre/unité de surface)	Nombre total de plants	Date de mise en culture
Pain de Coco	Fraise	6/ml	42	07/04/2017
	Tomate cerise	3/ml	21	10/04/2017
	Ciboulette	10/ml	70	04/05/2017
RAFT	Laitue	25/m <sup>2</sup>	50	07/04/2017
	Basilic	25/m <sup>2</sup>	100	12/04/2017
ZipGrow	Fraises	4/ml	36	07/04/2017
Billes d'argile d'argile	Tomate grappe	8/m <sup>2</sup>	24	12/04/2017
NFT	Fraise	7/ml	43	07/04/2017
	Menthe	7/ml	11	11/04/2017
	Aneth	7/ml	10	04/05/2017
	Coriandre	7/ml	11	12/04/2017
	Persil	7/ml	11	11/04/2017

## 4.2.2 Planning de production

Afin de proposer un futur itinéraire technique, un planning de production est mis en place réalisé à partir de notre expertise, de nos données et de références techniques (Chaux & Foury, 2008)

Tableau 17 : planning de production d'après les végétaux choisis dans le scénario économique (Perrot, 2017)

Supports	Densité	Unité	Espèces	Achat	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
PDC	2	m <sup>2</sup>	Chou Feuille	Annuelle	JP (gros)	R	R	R					Plantation		R	R
	2	m <sup>2</sup>	Chou Fleur	Annuelle	JP (gros)				Récolte					Plantation		
	4,5	m <sup>2</sup>	Tomates cer	Annuelle	JP GODET DE 7				Plantation		Récolte	Récolte	Récolte	Récolte		
	55	m <sup>2</sup>	Ciboulette	Vivace	Semis	Récolte	Récolte	Semis		Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte
NFT	21,00	m <sup>2</sup>	Fraises	Vivace	JP			Plantation (1	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte		
	21,00	m <sup>2</sup>	Persil	bisanuelle /vivace	Semis	récolte	récolte	Semis / récol	Récolte	récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte
	21,00	m <sup>2</sup>	Menthe	Vivace	JP// bouturage	Récolte	récolte	Plantation/ r	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte
Zip Grow	18	m <sup>2</sup>	Piment	Vivace	JP				Plantation (fin de mois )	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte			
	24	m <sup>2</sup>	Blettes	Annuelle	JP			Récolte					Plantation			
Argile	33	m <sup>2</sup>	Poireaux	Annuelle	JP			Récolte					Plantation (fin septembre / début oct )			
	8	m <sup>2</sup>	Tomates	Annuelle	JP				Plantation		Récolte	Récolte	Récolte			
RAFT	20	m <sup>2</sup>	Laitues	Annuelle	JP	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte
	25	m <sup>2</sup>	Basilic	Annuelle	JP	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation	Plantation
Tapis de coco		m <sup>2</sup>	Cresson	Annuelle	semis	Récolte	Récolte	Récolte	Récolte				Semis		Récolte	Récolte
Jardinières	23	m <sup>2</sup>	Radis	Annuelle	semis	Récolte	Récolte									Récolte
						Semis									Semis	Semis

Légende : Transition En culture Récolte Plantation/ semis

### 4.2.3 Principaux résultats de production

Les caractéristiques du pilote font que ce dernier reste fortement soumis à la température même si plusieurs dispositifs ont permis de diminuer l'amplitude thermique. Les conséquences sur les régularités des rendements végétaux peuvent être significatives et sur les plannings des récoltes peuvent être significatives (cf. 4.2.2).

#### 4.2.3.1. Paramètres physico chimiques de l'eau

Les paramètres de l'eau demeurent des indicateurs très importants pour la bonne conduite des cultures. Un suivi régulier de certains paramètres physico chimiques est nécessaire. Pour le végétal, le taux de certains nutriments est fondamental notamment pour les plantes fruits.

Tableau 18 : moyennes des analyses d'eau du cycle été 2016 (juin-octobre)

	Sortie Végétaux (mg/L)	Cuve de reprise (mg/L)
TAN	0,34	0,34
N-NO2	0,06	0,01
N-NO3	14,28	15,19
PO43-	2,55	1,64
K+	1,64	1,57
Fe	0,51	0,5
Ec	0,53	0,53
pH	7,2	7,2
O2		
T(°C)	19,2	19,2
TH	16,7	16

Tableau 19 : moyennes des analyses d'eau du cycle hiver 2016/2017 (novembre-mai)

	Sortie Végétaux (mg/L)	Cuve de reprise (mg/L)
TAN	0,45	0,47
N-NO2	0,05	0,04
N-NO3	18,29	17,11
PO43-	7,39	7,95
K+	10,09	10,09
Fe	0,93	0,94
Ec	0,67	0,65
pH	6,93	6,86
O2	9,66	9,69
T(°C)	11,55	11,55
TH	19,18	19,09

Les mesures pour les trois cycles (tableau 18, 19 et 20) montrent des valeurs faibles pour plusieurs éléments. Par exemple, l'EC a toujours été inférieure à 0,7 pendant les 3 cycles OPRA, alors que les valeurs standards en hydroponie dépassent 1 voire même 3 pour l'obtention de plantes fruits telles que les tomates (tableau 20). C'est un indicateur de la richesse d'éléments minéraux. Dans les solutions aqueuses, l'EC est directement proportionnelle à la quantité de nutriments dissous. En aquaponie, des niveaux faibles de 0,3 à 0,8 peuvent être suffisants car les nutriments générés le sont en continu à partir des effluents d'élevage et non pas distribués aux racines par batch via les solutions nutritives comme en hydroponie classique (Rackocy *et al.*, 2006 ; Lorena, *et al.*, 2008 ; Foucard *et al.*, 2015). Concernant la dureté totale, les valeurs obtenues toujours situées entre 15 et 20 °f correspondent aux conditions optimales évoquées dans la littérature (Foucard *et al.*, 2015).

Les autres éléments plutôt faibles mesurés sont les nitrates avec des valeurs moyennes comprises entre 11 et 18 ppm qui s'expliquent essentiellement par des biomasses piscicoles faibles. La littérature recommande d'avoir des teneurs variant de 50 à 100 ppm (Foucard *et al.*, 2015). Les autres valeurs azotées (Total Ammonia Nitrogen TAN et nitrites) sont inférieures aux seuils de toxicité pour les poissons. Les valeurs de fer et de potassium sont en période estivale inférieures aux chiffres recommandés en hydroponie pour certaines plantes fruits comme la fraise et surtout la tomate (tableau 20). Des ajouts réguliers (15j à 1 mois) du bicarbonate de potassium et du fer chélaté (DTPA) nous ont permis de limiter les risques de carences.

Tableau 20 : moyennes des analyses d'eau du cycle été 2017 (juin-août)

	Sortie Végétaux (mg/L)	Cuve de reprise (mg/L)
TAN	0,79	0,95
N-NO2	0,03	0,00
N-NO3	11,33	12,93
PO43-	2,17	2,63
K+	3,67	3,67
Fe	0,83	0,94
Ec (mS/cm)	0,65	0,64
pH	6,70	6,84
O2	7,51	7,53
T°C	21,33	21,00
TH	17,00	17,33

Tableau 21 : données théoriques paramètres de l'eau

	Tomate	Fraise	Laitue
EC, mS/cm	3,7	2	1,8
pH	5,5	6	5,5
NH4+ , meq/l	0,1	0,1	<0,4
K+	8	5	9,3
Na+	<8,0	<3,0	<5,0
Ca++	20	9	5
Mg++	9	4	1
NO3-	23	12	13,7
Cl-	<12,0	<3,0	<5,0
SO4- -	13,6	5	1,3
H2PO4-	1	0,7	0,7
Fe, mg/l	1,38	1,94	
Mn	0,39	0,39	
Zn	0,46	0,46	
B	0,54	0,22	
Cu	0,05	0,05	
Mo	0,05	0,05	

(Benoit, 2016 ; Le Quillec S. In Tocqueville et al., 2016)

Seul, le pH proche de la neutralité respecte le « compromis » voulu entre un pH plutôt acide favorable aux processus d'assimilation par les plantes et un pH légèrement basique nécessaire au fonctionnement optimum du filtre biologique. En effet, les plantes ont un potentiel de croissance optimal quand le pH est compris entre 5,8 et 6,5 (Hochmuth, 2012). Le biofiltre fonctionne le mieux avec un pH variant de 7,5 à 9 (Rakocy et al., 2006) et le compartiment piscicole entre 6,5 et 8.

#### 4.2.3.2. Suivi sanitaire des végétaux

Le règlement CE 2073/2005 du 15 novembre 2005 établit les critères biologiques applicables à certains microorganismes et les règles d'application que les exploitants du secteur alimentaire doivent observer lorsqu'ils mettent en œuvre les mesures d'hygiène générale. L'annexe 2.5 de ce règlement définit les critères microbiologiques retenus pour les « légumes, fruits et produits à base de légumes et de fruits (tableau 22). L'AFSSA préconise également de mesurer la présence de salmonelles, de micro-organismes aérobies à 30°C et la listeria monocytogène (Foucard et al., 2015).

Des analyses de nitrates sur les feuilles de salades ont été effectuées. Le règlement (CE) 1881/2006 décrit les teneurs maximales en nitrates que peuvent contenir différents légumes à feuille pour respecter la réglementation sanitaire en termes de contaminants. Plusieurs études ont montré que les laitues produites avec des effluents d'élevage aquacole en hors sol ou en aquaponie présentaient un taux de nitrates inférieurs à 3 500 mg/kg (Rico Garcia, et al., 2009; Pantanella et al., 2010) qui est la teneur maximum à ne pas dépasser pour des cultures de laitues sous abri en période estivale.

Pour l'étude OPRA, deux analyses microbiologiques avec recherche de nitrates sont effectuées par un laboratoire agréé COFRAC sur des feuilles de salade prélevés en juillet (2016 et 2017). Les valeurs trouvées sont toujours inférieures aux recommandations (tableau 21). La valeur maximum mesurée en nitrate n'a pas dépassé 3000 mg/kg (annexe 5).

Tableau 22 : valeurs microbiologiques de référence pour les légumes fruits et valeurs mesurées sur des salades du pilote OPRA

Paramètres sanitaires des produits	Valeurs mesurées sur des feuilles de salades OPRA	Valeurs souhaitées (végétaux pour conso. humaine)	Unité
Escherichia coli / g	< 10	< 100	UFC/g
Salmonelles / 25g	0	0	UFC/25g
Microorganismes aérobies à 30°C / g	970 000	< 50 000 000	UFC/g
Staphylocoques à coagulase positive à 37°C	< 10	< 100	UFC/g
Teneurs en nitrates (mg NO3/kg) Laitues	< 3 000	< 4 500 hiver < 3 500 été	

#### 4.2.3.3. Productions végétales hivernales

Un seul cycle hivernal est étudié, celui de l'hiver 2016/2017. Des premiers essais avaient quand même été mis en place durant l'hiver 2015/2016.

Les poireaux ont présenté de bonnes performances sur les billes d'argile, avec un rendement moyen de 4,6 kg/m<sup>2</sup> (tableau 23).

De même, la productivité du cresson a été assez importante, 48.2 kg au total et pourrait être optimisée car les semis ont été réalisés en mars alors que la période la plus propice est en plein hiver (tableau 23).

Les performances des choux pourraient être optimisées en augmentant le nombre de cycles de production, de même que pour les radis. Ces deux espèces seront conservées dans le scénario économique afin d'apporter une diversité intéressante (tableau 23).

Les blettes ont également présenté de bonnes performances sur ZipGrow et la conduite de culture est très simple. Ce support a donc été intégré dans le scénario économique de cette phase d'étude (figure 39 et 40).

Par contre, les épinards et les navets n'ont jamais vraiment bien poussés. Le même constat avait été fait pendant l'hiver 2015/2016 lors de premiers essais. Pour les épinards, ce constat est partagé avec les acteurs d'APIVA (Foucard com. Pers.). Les faibles valeurs d'électroconductivité et de fer pourraient expliquer ces résultats.



Figure 39 : photo de cultures de poireaux, choux et radis en février 2017

Tableau 23 : données de performances végétales du cycle hiver 2016-2017

Espèce	Variété	Support	Quantité totale récoltée (kg)	Nombre de plants	Durée de récolte (sem.)	Densité de plantation	Poids moyen d'1 plant (g)	Rendmt moyen hebdo. par unité de surface (kg / unité surface/sem.)*
Laitue	Bafana	RAFT	13,07	50	2	25/m <sup>2</sup>	261,47	3,3
Poireaux		Billes d'argile	12,34	88	1 récolte	33/m <sup>2</sup>	140,18	4,6
Blettes		Zip Grow	2601,9	36	1 récolte	4/ml	72,28	0,3
Cresson	De fontaine à larges feuilles	Tapis de coco	48,2		6	8 m <sup>2</sup>		1,0
Radis		Jardinières	1,335	89	1 récolte	23/ml	15	0,35
Chou feuille	Kale	PDC	4,02555	14	1 récolte	3/ml	287,5	0,86
Chou fleur	Romanesco	PDC	2,448	6	1 récolte	2/ml	408	0,816

Sem. : Semaines ; \*

Les espèces citées dans le tableau 23 sont gardées dans le scénario économique pour le redimensionnement de la serre. La ciboulette est également ajoutée. Moins productive qu'en été, elle apporte néanmoins une diversification supplémentaire.



Figure 40 : photos de cultures de blettes, de cresson, de radis, de choux et de poireaux (smidap)

#### 4.2.3.4. Productions végétales estivales - Cycle estival 2016

Le premier cycle estival a permis de travailler sur un choix de variétés pour certaines espèces comme la fraise ou la tomate et sur les meilleurs rendements selon les supports hydroponiques.

- *Les variétés de fraises présentent-elles des différences de rendement ?*

Cinq variétés de fraises différentes sont produites sur le support NFT et quatre variétés sur Pain de coco (tableau 24). Suite aux vols de plants de fraises le 22 mai 2016, les variétés sur les différents supports n'ont pas toujours été les mêmes.

Tableau 24 : variétés de fraises produites

Support NFT	Support Pain de Coco
`Ananas`	`Annabelle`
`Charlotte`	`Cirafine`
`Cijosée`	`Mara des Bois`
`Cirafine`	`Mariguette`
`Mara des Bois`	

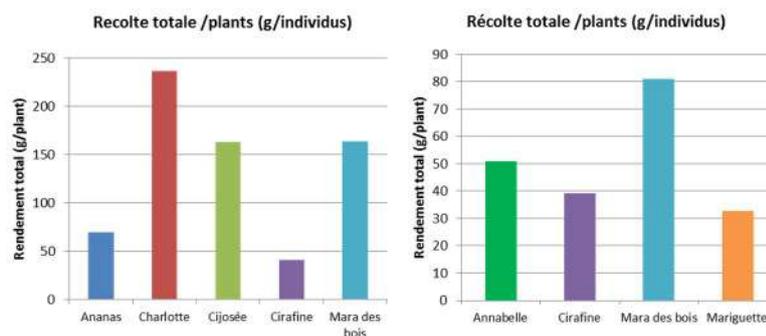


Figure 41 : rendements totaux/plants sur NFT (à gauche) sur Pain de Coco (à droite)(Benoit, 2016)

Sur NFT, les rendements maximum sont obtenus avec la variété `Charlotte` avec environ 240g/plant (figure 41). Des tests de comparaison deux à deux sont réalisés par le test de Kolmogorov Smirnov sur la distribution des rendements au cours du temps. En comparant la distribution des rendements au cours du temps (test de Kolmogorov Smirnov), il existe une différence significative de distribution entre la `Charlotte` et les variétés `Ananas` et `Cirafine`. Les autres variétés semblent suivre la même distribution au cours du temps. La production de `Charlotte` semble donc la plus productive, tandis que `Ananas` et `Cirafine` produisent moins et de façon moins régulière.

Concernant la production sur Pain de Coco, le rendement maximum est obtenu avec la `Mara des Bois`, qui présente aussi une distribution significativement différente des trois autres variétés (figure 41). La `Charlotte` et la `Mara des Bois` sont retenues comme meilleures variétés sur nos modes de production. Le Ciref (Création Variétés Fraisiers Fruits rouges) (2016), créateur de la variété `Charlotte`, précise que les besoins azotés de cette plante sont relativement faibles (4 meq) en période de production, ce qui peut justifier les hauts rendements obtenus pour cette variété. De plus, ce cultivar est apparenté à celui de la `Mara des Bois`, ce qui peut expliquer les similitudes de productivités obtenues.

- *Les supports permettent-il d'obtenir des rendements différents pour une même variété de fraises ?*

Concernant la comparaison des supports de cultures pour la production de fraises (variété `Mara des Bois`), une production significativement supérieure pour le support NFT est obtenue par rapport au support coco (Test de Kolmogorov-Smirnov, p-value = 0.010). La `Mara des Bois` est la variété la plus productive sur Coco mais pas sur NFT, or les résultats sont considérablement meilleurs sur NFT. On conclut donc une meilleure productivité générale du support NFT (figures 42 et 43).

En 2012, une étude a montré qu'en hydroponie la culture sur NFT était significativement plus productive (plus de fruits et plus gros fruits) que la culture sur Pain de coco (İncemehmetoglu, 2012).

Les résultats montrent la même tendance sur une production en aquaponie.

Ces informations nous incitent donc à retenir ce support pour le dimensionnement et l'analyse technico-économique.

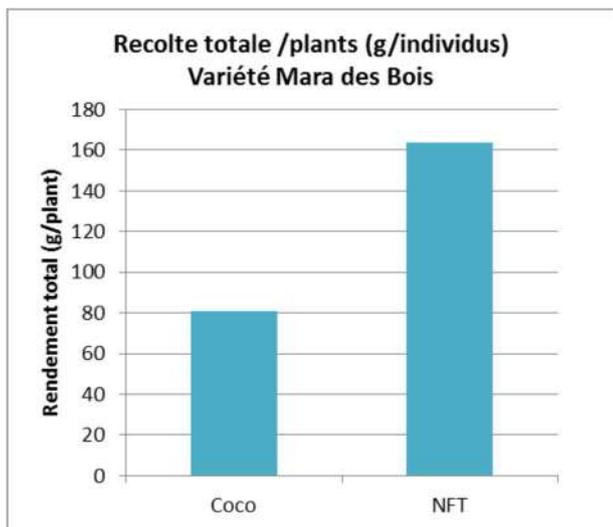


Figure 42 : rendements totaux par plant obtenus sur deux supports (Benoit, 2016)



Figure 43 : photo de fraise Mara sur NFT (smidap)

- Les variétés de tomates présentent-elles des différences de rendement ?

Support billes d'argile	
'Ananas'	'Noir de crimée'
'Cœur de Boeuf'	'Saint Pierre'
'Grappeline'	
'Green Zebra'	
'Maestia'	

Plusieurs variétés de tomates sont testées lors du cycle estival de 2016, les variétés 'Ananas', 'Cœur de bœuf', Grappeline', Green Zebra', Maestia, 'Noir de Crimée' et 'Saint Pierre'. Les rendements de différentes variétés de tomates sont comparés (tableau 25 et figure 44). Le rendement total par plant apparaît comme supérieur pour la variété 'Grappeline', avec des valeurs hebdomadaires dépassant les 400 grammes de tomates par plant. Cependant nous n'avons pas pu mettre en évidence de différence significative. Ceci s'explique par les itinéraires techniques mis en œuvre et développés précédemment

Tableau 25 : variétés de tomates produites

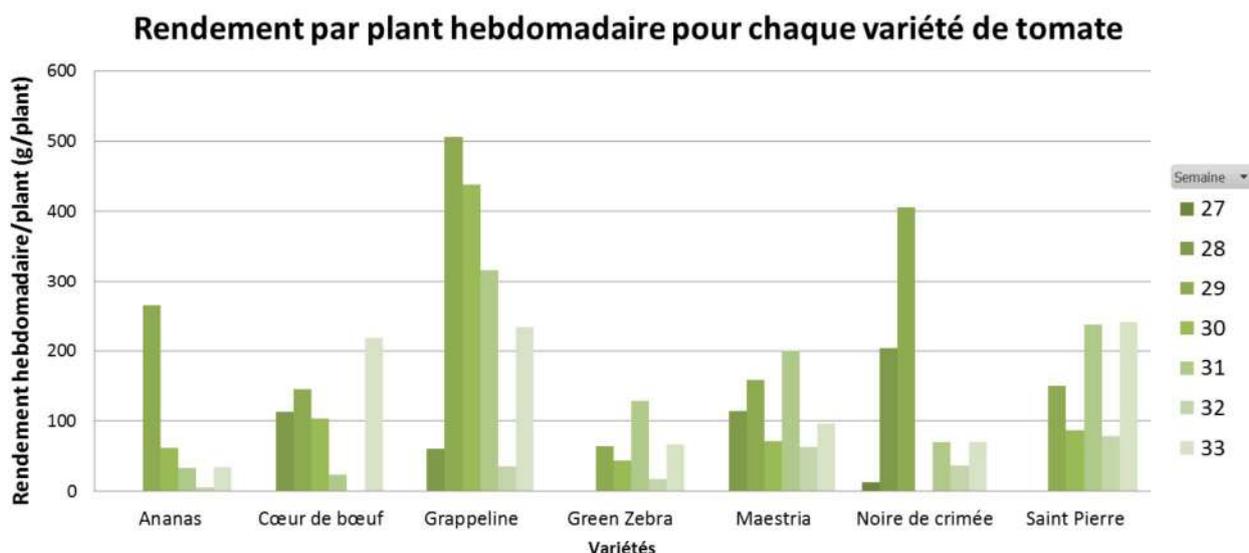


Figure 44 : rendement hebdomadaire par plan en fonction de différentes variétés de tomates (Benoit, 2016)

Ces résultats de rendement pour les tomates restent assez modestes, principalement en raison de la configuration du pilote avec une hauteur de serre trop limitée. Les tomates grappes seront testées lors du cycle estival 2017.



Figure 45 : Exemple d'une récolte pour un panier avec différentes variétés de tomates (smidap)

- *Quel support meilleur support pour les plantes aromatiques?*

Concernant les herbes aromatiques, les rendements totaux obtenus pour chacune des espèces sont exprimés dans le tableau 26. L'objectif est de trouver le meilleur scénario pour chaque espèce pour l'analyse économique.

Tableau 26 : résultats de production d'herbes aromatiques durant le cycle estival 2016

Espèce	Support	Rendement moyen hebdomadaire / unité de surface (kg/m/semaine)
Persil	NFT	45 g/ml/sem
Basilic	NFT	68 g/ml/sem
Basilic	Coco	60 g/ml/sem
Basilic	Raft	88 g/m <sup>2</sup> /sem
Ciboulette	NFT	11 g/ml/sem
Ciboulette	Coco	16.8 g/ml/sem

Les couples « espèce support » retenus pour le cycle estival de 2017 sont le Persil sur NFT, la ciboulette sur pain de coco et le basilic sur raft.

- Cycle estival 2017

Des rendements moyens hebdomadaires sont établis à partir des données brutes de récoltes et de suivi des végétaux afin de les utiliser comme références pour le scénario économique.

• *Plantes aromatiques.*

Par rapport à l'année 2016, les rendements sont en général nettement meilleurs sur les aromates. L'amélioration des pratiques phytotechniques ainsi que les températures moyennes plus élevées (température moyenne de 22 °C contre 18 °C en 2016) permettent d'expliquer ces résultats (figure 46). En effet, la corrélation positive entre le rendement de ces espèces et de la température avait été démontrée lors du premier cycle de la phase d'OPRA2 (Benoit, 2016 et annexe13). De plus, les herbes aromatiques sont des espèces peu exigeantes en éléments nutritifs comparées à d'autres espèces notamment de plantes fruits comme les tomates ou les fraises.

Cependant, les rendements n'ont pas été optimisés. Les éléments nutritifs demeurent faibles. Les taux de nitrates ont été plus faibles qu'en 2016.



Figure 46 : photo de différentes variétés de basilic sur RAFT (smidap)

Ces couples espèces/support sont retenues pour le scénario économique de dimensionnement de la serre. La menthe et le persil se feront sur NFT, le basilic sur RAFT et la ciboulette sur pain de coco (tableau 27). A noter que pour le Basilic et la menthe, les rendements sont beaucoup plus élevés sur les variétés communes (respectivement Grand Vert et Marocaine). Ces variétés pourront représenter dans notre scénario économique une plus grande proportion que les autres qui serviront de petite diversification.

L'aneth et la coriandre n'ont présenté aucun résultat convaincant durant cette période de production (aucune récolte n'a pu être effectuée), les excluant toutes deux du scénario de dimensionnement.

Espèce	Variété	Support	Quantité totale récoltée (kg)	Nombre de plants	Durée de récolte (sem.)	Densité de plantation	Unité	Rendement moyen/ plant (g/plant/semaine)	Rendement moyen / unité de surface (g/unité de surface/sem)
<b>Menthe</b>	Maroc	NFT	1,16	3	7	7,00	MI	55,11	385,77
	Basilic	NFT	0,72	3	7	7,00	MI	34,28	239,98
	Poivrée	NFT	0,18	3	6	7,00	MI	10,06	70,44
	Chocolat	NFT	0,18	3	6	7,00	MI	10,06	70,44
<b>Persil</b>	Frisé	NFT	1,37	11	7	7,00	MI	17,78	124,43
<b>Ciboulette</b>		PDC	1,87	70	7	10,00	MI	3,82	38,24
<b>Basilic</b>	Grand vert	RAFT	8,12	75	7	25	m <sup>2</sup>	15,46	386,51
	Pourpre	RAFT	0,53	12	6	25	m <sup>2</sup>	7,39	184,73
	Grec	RAFT	1,56	13	7	25	m <sup>2</sup>	17,14	428,43

Tableau 27 : résultats phyto-techniques des aromates du cycle été 2017 (Perrot, 2017)

• Fraises.

Les rendements en fraises en 2017 sur chaque support sont nettement moins bons que ceux de l'année dernière, alors que les conditions de température ont été plus favorables cette année.

Une explication à ce phénomène peut être l'apparition de thrips sur les fraises à partir de début mai 2017 (ravageurs de très petites tailles provoquant des déformations de la fleur de la fraise) (figure 47). Une lutte biologique a été mise en place avec l'utilisation d'*Amblyseius Cucumeris*, leurs prédateurs naturels.

Entre 15 et 35% de la récolte totale présentaient les symptômes des thrips, la rendant inapte à la commercialisation.

A noter aussi que ce sont des plants de première année, qui gagneront certainement en productivité au cours des années suivantes.



Figure 47 : dégâts causés par les thrips sur les fraises (Perrot L.)

Support	Variétés	Quantité totale récoltée (kg)	Nombre de plants	Durée de récolte (semaines)	Densité de plantation (plants / ml)	Rendement moyen/ plant (g/plant/semaine)	Rendement moyen / unité de surface (g/unité de surface/se maine)	Proportion de la récolte affectée par les thrips (%)
<b>ZIPGROW</b>	<i>Mara des Bois</i>	1,13	18	14	4	4,49	17,95	15,21
	<i>Charlotte</i>	0,22	18	10	4	1,23	4,94	21,12
<b>NFT</b>	<i>Mara des Bois</i>	1,57	21	14	7	5,36	37,49	22,71
	<i>Charlotte</i>	0,20	21	10	7	0,97	6,78	35,93
<b>Pain de Coco</b>	<i>Mara des Bois</i>	1,57	31	14	6	3,62	21,74	19,48
	<i>Charlotte</i>	0,20	11	10	6	1,85	11,12	30,11

Tableau 28 : données phyto-techniques des deux variétés de fraises cycle été 2017

Comme l'année dernière, c'est le support NFT qui permet d'atteindre les meilleurs résultats de rendement (tableau 28). Ce support sera donc sélectionné pour le scénario économique de dimensionnement. La Charlotte a été beaucoup moins productive que la Mara des Bois car les suivis se sont arrêtés en août et la Charlotte est une variété plus tardive. Connaissant les résultats de 2016, Il sera tout de même intéressant de garder les deux variétés pour le scénario économique et d'y intégrer également une troisième variété semi-tardive pour avoir une production continue d'avril à septembre.

Le ZipGrow, qui était le nouveau support testé sur la fraise cette année, n'a pas présenté de résultats convaincants. Ce constat est en partie lié à une irrigation trop importante non adaptée à une culture de fraises. Ce support sera gardé dans le scénario économique pour produire du piment, qui, d'après la bibliographie présente des performances intéressantes (Foucard *et al.*, 2015).

• Tomates Grappes et Cerises

Deux variétés de tomates sont testés à partir des rendements obtenus en 2016: la tomate Grappe MATINA et la tomate Cerise (*Solanum lycopersicum* var cerasiforme) sur Pain de Coco.

Les rendements des tomates grappes sur billes d'argiles sont meilleurs que l'année dernière toutes variétés confondues soit 240g/plant/semaine au lieu de 118 g/plant/semaine. Par contre, la variété Grappeline avait eu un meilleur rendement en 2016, avec 318g/plant/semaine. Ces résultats sont encourageants quant à la production de tomates dans un système aquaponique. La tomate MATINA est une variété précoce qui nous a permis d'obtenir des fruits très tôt dans l'année (début du mois de juin) et de petits calibres (figure 48).



Figure 48 : photo des tomates grappes début juillet 2017 (smidap)

Toutefois, le rendement n'est certainement pas optimisé par nos conditions de cultures, avec une faible hauteur disponible et avec un EC moyen de 0,64 mS/cm alors que théoriquement une culture de tomates en hydroponie requiert un EC d'environ 3,7 mS/cm (tableau 20 et 21).

Cependant, des tomates ont quand même été produites malgré les données disponibles en hydroponie. Ce phénomène nous conforte dans l'idée d'une symbiose entre végétaux, populations bactériennes et poissons permettant une production de tomates malgré un EC très faible, ou bien de la meilleure efficacité de l'irrigation en continue. (D'après Serge le Quillec *In* Benoit, 2016). La faible hauteur de la serre tunnel, 2,2 mètres max, a aussi fortement limité les résultats. Elle est trop basse pour la culture de tomates. Les chaleurs du mois de juin ont mené à la perte des fleurs situées en hauteur.

Concernant les tomates cerise, peu de données de rendements sont disponible sur le pilote, les variétés commençant simplement à produire début juillet. Elles se sont montrées moins sensibles à la chaleur que les grappes. Malgré l'absence de données significatives, la tomate Cerise est gardée pour le scénario économique afin d'apporter de la diversification (tableau 29).

Tableau 29 : performances zootechniques Tomate Grappe et Cerise cycle été 2017

Espèces	Support	Variétés	Quantité totale récoltée (kg)	Nombre de plants	Durée de récolte (semaine)	Densité de plantation (plants / ml)	Rendement moyen/plant (g/plant/semaine)	Rendmt moyen / unité de surface (kg/unité de surface/sem.)	Poids moyen d'1 tomate (g)
<b>Tomate grappe</b>	Bille d'argile	MATINA	23,08	24	4	8/ m <sup>2</sup>	240,39	1,92	43,46
<b>Tomate cerise</b>	PDC	Principe Borghese	0,27	12	3	3/ml	7,51	0,02	20,81
		Golden Cherry	0,48	9	3	3/ ml	17,85	0,05	13,02

Pour le scénario économique du cycle été, les végétaux choisis sont, la menthe (*Mentha Spicata*) (75 % avec la variété Marocaine), le persil frisé (*Petroselinum crispum*), les fraises Mara des Bois (*Fragaria Vesca*) et Charlotte (*Fragaria Ostara*) sur NFT, le basilic (*Ocimum basilicum*) (la variété grand vert présente pour 75 % de l'ensemble) et la laitue (*Lactuca sativa* var. capitata) sur RAFT, les tomates cerises (*Solanum lycopersicum* var. cerasiforme) et la ciboulette (*Allium schoenoprasum*) sur pain de coco, les tomates grappes (*Solanum lycopersicum*) sur billes d'argiles.

Le piment fin (*Capsicum annuum*) est rajouté sur Zip Grow.

## 5. Analyse technico-économique

Certaines productions issues de l'étude OPRA sont vendues soit à des pisciculteurs pour les poissons soit à des particuliers ou au restaurant pédagogique pour les végétaux. Concernant ces derniers, la vente directe à la serre était possible à certaines périodes (annexe 14).

Plusieurs essais avec différentes espèces piscicoles à des tailles variables et avec plusieurs espèces piscicoles ont amenés à tester des scénarios pour l'évaluation économique.

### 5.1. Choix des scénarios

#### 5.1.1. Volet végétal

A partir de nos résultats de production et avec l'aide de la littérature, un choix d'espèces est réalisé pour le cycle hivernal et le cycle estival pour l'évaluation économique. Chacune de ces espèces végétales a été associée à un support hydroponique. Ces derniers seront occupés lors des deux cycles saisonniers à l'exception des jardinières et des tapis de coco qui ne servent que l'hiver. Mais ces deux supports sont positionnés sur les tables à la place de pains de cocos (tableau 30).

Tableau 30 : choix des variétés végétales et des supports selon le cycle estival et le cycle hivernal

Supports	RAFT	NFT	Pains de coco	Billes d'argile	Zipgrow	Jardinières	Tapis de coco
<b>Variétés</b>							
Laitue Bafana							
Fraise Mara							
Fraise Charlotte							
<b>Cycle été</b> Basilic Grand vert							
Autre basilic							
Tomates grappes							
Tomates cerises							
Persil frisé							
Piment							
Ciboulette							
Poireaux							
Salades d'hiver							
<b>Cycle hiver</b> Radis							
Chou fleur Romanesco							
Chou feuille Kale							
Blettes							
Cresson							

### 5.1.2. Volet piscicole

Le choix de l'espèce hivernal s'est portée sur la truite arc en ciel et celui de l'espèce estival sur le sandre au vue des performances constatées. Pour chaque espèce, deux tailles initiales d'alevinage ont été testées avec succès. Pour l'évaluation économique, quatre scénarios sont testés.

**Scénario A : Truites de 70 g. et Sandres de 10 g.**

**Scénario B : Truites de 70 g. et Sandres de 200 g.**

**Scénario C : Truites de 300 g. et Sandres de 10 g.**

**Scénario D : Truites de 300 g. et Sandres de 200 g.**

## 5.2. Dimensionnement, produits et charges

### 5.2.1. Détermination des rendements et des chiffres d'affaires

L'objectif est maintenant de dimensionner un outil de production rentable. Les premières simulations en 2016 lors de la première phase d'OPRA avaient d'estimer une surface minimum de serre de 200 m<sup>2</sup> (Benoit, 2016). Un premier essai de dimensionnement d'une serre de 202.8 m<sup>2</sup> avait ainsi été réalisé à partir des premières données obtenues sur le pilote OPRA en 2016 (Hinckel & Louis-Sydney, 2017). En rajoutant une surface non utile de 20%, les premières simulations avaient déterminé une surface totale piscicole de 31,25m<sup>2</sup> et une surface totale végétale de 158,8 m<sup>2</sup> (tableau 31).

Tableau 31 : premier essai de dimensionnement d'une serre de 202.8 m<sup>2</sup> (Hinckel & Louis-Sydney, 2017)

<b>Surface de la serre : 202.8 m<sup>2</sup></b>	
<b>Surface utile piscicole : 25 m<sup>2</sup></b>	<b>Surface totale piscicole : 31.25 m<sup>2</sup></b>
<b>Surface utile de filtration : 7.5 m<sup>2</sup></b>	<b>Surface totale de filtration: 9.4 m<sup>2</sup></b>
<b>Surface utile végétale : 127 m<sup>2</sup></b>	<b>Surface totale végétale : 158.8 m<sup>2</sup></b>

Les résultats complémentaires obtenus durant l'hiver 2016/2017, lors du cycle estival 2017 et les différents scénarios économiques vont permettre d'améliorer les résultats de cette première simulation en termes d'espace et de rentabilité. Les critères de performances ayant été étudiés précédemment, c'est la rentabilité économique qui est recherchée, c'est-à-dire la différence entre le résultat généré par la production et les moyens engagés pour la mettre en place.

#### 5.2.1.1. Volet végétal : détermination des rendements

Afin d'améliorer la précision de l'étude économique, les variations des rendements et des prix de vente mensuellement et non par cycles (été / hiver) sont étudiées.

Pour les espèces qui présentaient des conditions de productions non optimales comme les choux ou les radis (pas assez de cycles), la CAB (Coordination Agrobiologique des Pays de Loire) et la Chambre d'Agriculture de Vendée nous ont fourni des références de rendements biologiques sous abri ainsi que certaines données manquantes, notamment des rendements pour les tomates cerise et les piments.

A partir des données récoltées, les rendements mensuels sont calculés afin de les intégrer dans le dimensionnement économique selon les espèces. Les rendements de chaque espèce sont multipliés par les prévisions de prix calculés à partir des séries de prix des données du Marché d'Intérêt National de Nantes (cf. 2.5.2.).

Tableau 32 : prix de vente (€/kg) par espèce retenue dans le projet (V. Le Bihan, d'après données FranceAgriMer)

Espèce	Persil frisé	Fraises	Basilic	Ciboulette	Poireau	Blettes	Tomates Grappes	Chou Fleur	Laitue	Cresson	Tomates cerises	Radis	Chou Feuille	Menthe	Piment
Mois															
Janvier	5,03			4,50	1,85	2,00		1,78	4,33	4,36		4,09	0,97	3,60	1,22
Février	5,01			4,50	2,16	1,95		1,59	4,61	4,74		4,34	0,96	3,63	1,21
Mars	5,03			4,50	2,18	2,12		1,57	4,26	4,69		4,20	0,99	14,63	1,29
Avril	4,76	13,89		4,40	1,90	1,91		1,67	3,75	4,19		4,18	1,00	9,20	1,59
Mai	4,76	12,36	18,00	4,10	2,09	1,90	3,81	2,18	3,34	3,84		4,08	1,19	9,20	1,63
Juin	4,76	12,53	13,50	4,22	2,84	2,00	3,57	1,84	2,80	3,96	5,60	3,85	1,21	9,00	1,47
Juillet	4,75	13,22	4,43	4,32	2,57	2,04	2,67	2,12	2,80	3,83	5,90	3,92	1,15	9,00	1,44
Août	4,74	12,59	4,40	4,33	2,27	1,93	2,63	2,39	2,60	4,00	5,41	4,03	1,12	9,00	1,33
Septembre	4,75	12,71	38,63	4,43	1,97	2,07	3,24	2,39	3,32	3,90	5,57	3,97	1,15	9,00	1,31
Octobre	4,91		36,33	4,43	1,63	1,83	3,69	1,96	3,64	3,53	6,01	3,98	1,11	9,00	1,48
Novembre	4,90			4,43	1,67	1,81	3,11	1,86	3,87	3,66		3,95	1,06	9,27	1,20
Décembre	4,91			4,45	1,63	1,92	3,00	1,60	3,67	3,85		4,08	0,92	3,64	1,22

Le chiffre d'affaires/ espèce/ m<sup>2</sup> /mois ainsi déterminé permet d'estimer la proportion du chiffre d'affaires issue de chaque support par rapport au chiffre d'affaires total au m<sup>2</sup> (tableau 32).

Tableau 33 : proportion du CA/support/m<sup>2</sup> en hiver et en été (Perrot, 2017)

CA HIVER	€/m <sup>2</sup>	434,58	100%
PDC	€/m <sup>2</sup>	33,1	7,62%
NFT	€/m <sup>2</sup>	175,8	40,46%
ZIP	€/m <sup>2</sup>	4,4	1,02%
GROW			
ARGILE	€/m <sup>2</sup>	12,5	2,88%
RAFT	€/m <sup>2</sup>	39,4	9,08%
Tapis	€/m <sup>2</sup>	150,4	34,62%
Jardinière	€/m <sup>2</sup>	18,8	4,32%

CA ÉTÉ	€/m <sup>2</sup>	1 153,71	100,00%
PDC	€/m <sup>2</sup>	163,7	14,19%
NFT	€/m <sup>2</sup>	652,8	56,59%
ZIP GROW	€/m <sup>2</sup>	11,6	1,01%
ARGILE	€/m <sup>2</sup>	86,8	7,52%
RAFT	€/m <sup>2</sup>	238,8	20,70%

Les quantités produites et les prix de vente des espèces en été génèrent logiquement un CA estival (1 153,71 €/m<sup>2</sup>) beaucoup plus important que celui hivernal (434.58 €/m<sup>2</sup>). La détermination des surfaces des supports se fera à partir des pourcentages du CA estival seulement. En appliquant ces pourcentages à la surface utile végétale de la serre, soit 127 m<sup>2</sup> (tableau 30), les surfaces de chaque support sont obtenues dans la nouvelle serre dimensionnée (tableau 35). Par exemple, le NFT rapporterait d'après nos données 652,8 €/m<sup>2</sup>, soit presque 57% du CA total (tableau 33). Ainsi, la surface de NFT représentera 57% de la surface végétale utile de la serre projet.

Tableau 34 : surfaces définies pour chaque support par rapport aux ratios du CA été (Perrot, 2017)

	Proportion par rapport au CA total	Surfaces calculées (m <sup>2</sup> )
<b>Total</b>	100,00%	127,0
<b>PDC</b>	14,19%	18,0
<b>NFT</b>	56,59%	72
<b>ZIP GROW</b>	1%	1
<b>ARGILE</b>	7,52%	10
<b>RAFT</b>	20,70%	26

### 5.2.1.2. Volet piscicole : détermination de la densité de poissons pour nos deux espèces

Avec l'ensemble des surfaces végétales à notre disposition, la valeur du RTA peut être définie. Les surfaces en NFT, pain de coco et billes d'argiles représentent 78 % de la surface végétale utile (tableau 33), ce qui n'implique pas une forte dilution de nos nutriments dans le système. De plus, une forte proportion en aromates, laitues puis légumes feuilles, peu exigeants en nutriments, sont présents sur nos deux cycles. Enfin, un type d'aliment riche en protéine (46% et 49%) (annexes 6 et 7) est utilisé comparé à des aliments pour Tilapia par exemple, espèce très représentée en aquaponie (figure17).

Ainsi, une valeur assez faible de RTA, soit 40g d'aliment / m<sup>2</sup> de surface végétale / jour. Ce ratio n'est bien sûr pas définitif et pourra être ajusté selon les observations et le suivi du système.

Ce ratio est appliqué sur nos différentes espèces, sandres de 10 à 50 g et de 200 à 650 g et truites de 70 à 600g et 300 à 900g et plus précisément sur la densité finale. En effet, il est difficile d'appliquer ce ratio sur la densité initiale et finale en même temps car cela implique des différences importantes entre l'effectif initial et final, ce qui entrainerait des sorties de poissons importantes pendant l'élevage, ce qui rend la conduite d'élevage plus délicate pour l'aquaponiculteur tout en complexifiant également l'étude économique.

Le choix d'appliquer ce RTA sur la densité finale fait que la biomasse végétale sera plus importante et donc plus exigeante en nutriments que si les calculs étaient partis de la densité initiale. Une fois la densité finale estimée, les taux de survie définis expérimentalement sont appliqués (paragraphe sur les performances zootechniques) afin de déterminer la densité initiale (tableau 34).

Avec cette méthode, des densités d'élevage assez élevées sont estimées (jusqu'à 50 kg/ m<sup>3</sup> pour les truites). Dans le cadre d'une approche aquaponique durable, le choix de limiter les densités d'élevage s'est imposé soit par exemple une limite de 25 kg/ m<sup>3</sup> pour les truites, densité maximale imposée par le cahier des charges d'aquaculture biologique (Commission des communautés européennes, 2009). Cependant, il n'existe pas de cahier des charges bio pour le sandre. Cette espèce se montre habituellement plus tolérante à des faibles teneurs en oxygène dans l'eau et beaucoup plus adaptable à des densités assez élevées soit entre 30 et 60 kg/m<sup>3</sup> (Dalsgaard *et al.*, 2013). Pour l'évaluation économique, le choix s'est porté sur une densité de 40 kg/m<sup>3</sup> pour le sandre.

Ces résultats impliquent de rajouter un bassin d'élevage par rapport aux quatre bassins initialement prévus dans l'étude sur la serre de 202.8 m<sup>2</sup>, soit cinq bassins dans la nouvelle serre dimensionnée.

A noter des valeurs d'IC assez élevés par rapport à nos résultats réels en grande partie liées à une surestimation de la quantité d'aliment distribuée en début d'élevage (tableau 34).

Dans cette nouvelle unité redimensionnée, les densités d'élevage sont plus élevées que dans le pilote, ce qui implique la présence d'un système d'alarme lié aux contrôles des paramètres de l'eau (O<sub>2</sub>, pH, température). Un groupe électrogène est aussi nécessaire (à prévoir dans les charges) afin d'éviter la perte totale du cheptel en cas de problème technique.

Tableau 35 : données zootechniques sandres et truites pour la serre projet avec méthode du RTA appliquée sur la densité finale.

Conduite d'élevage	Sandres de 10g à 50g	Sandres de 200 g à 650g	Truites de 70g à 600g	Truites de 300g à 900g
Aliment total distribué / jour (g) (pour un RTA donné)	5 078,49	5 078,49	5 078,49	5 078,49
Effectif final	11 130	1563	940	723
Densité finale (kg/ m <sup>3</sup> )	21,3	38,3	21,3	24,6
Taux de survie	0,94	0,95	0,97	0,91
Effectif initial	11 840	1 645	970	795
Densité initiale (kg/ m <sup>3</sup> )	4,5	12,4	2,6	9,1
Gain de poids (kg)	445,9	686,7	496,4	411,0
IC calculé avec RTA	1,5	0,9	1,8	2,1

### 5.2.1.3. Dimensionnement de la serre

A partir des choix réalisés sur le volet végétal et sur le volet piscicole, le premier projet de dimensionnement réalisé en 2016 se révèle sous-évalué. Pour que la serre soit bien agencée avec la mise en place d'un espace de travail dans la serre, il faudrait en réalité une serre de 34 m de longueur au lieu de 26, soit, une serre de 265.2 m<sup>2</sup> (34m x 7.8m). Cette nouvelle phase d'étude a donc permis d'obtenir une taille de serre dimensionnée plus grande que les années précédentes avec une surface utile d'élevage de 31,25 m<sup>2</sup> et une surface utile de culture de 127 m<sup>2</sup> (tableau 35).

Tableau 36 : dimensionnement des unités de production de la serre d'aquaponie OPRA2 2017

Libellé de l'unité	Dimensions
Volume d'élevage ( m <sup>3</sup> )	26,5
Volume unitaire bassin ( m <sup>3</sup> )	5,3
Surface utile d'élevage (m <sup>2</sup> )	31,25
Surface totale d'élevage (m <sup>2</sup> )	34,72
Surface utile de culture végétale (m <sup>2</sup> )	127
Surface totale culture végétale	158,70
Volume de filtration biologique et mécanique ( m <sup>3</sup> )	1,4
Surface utile filtration (m <sup>2</sup> )	7,5
Surface totale filtration (m <sup>2</sup> )	9,4
Surface totale de la serre (m <sup>2</sup> )	265.2

A partir de ces nouvelles données, un travail sur une optimisation de l'agencement de la future serre est réalisé. La figure 49 ci-après représente une proposition de schéma d'agencement de cette serre redimensionnée.

Schéma d'agencement de la serre de 265,2 m<sup>2</sup> (34x7.80) (OPRA 2017) (Crédit : Lisa Perrot, 2017)

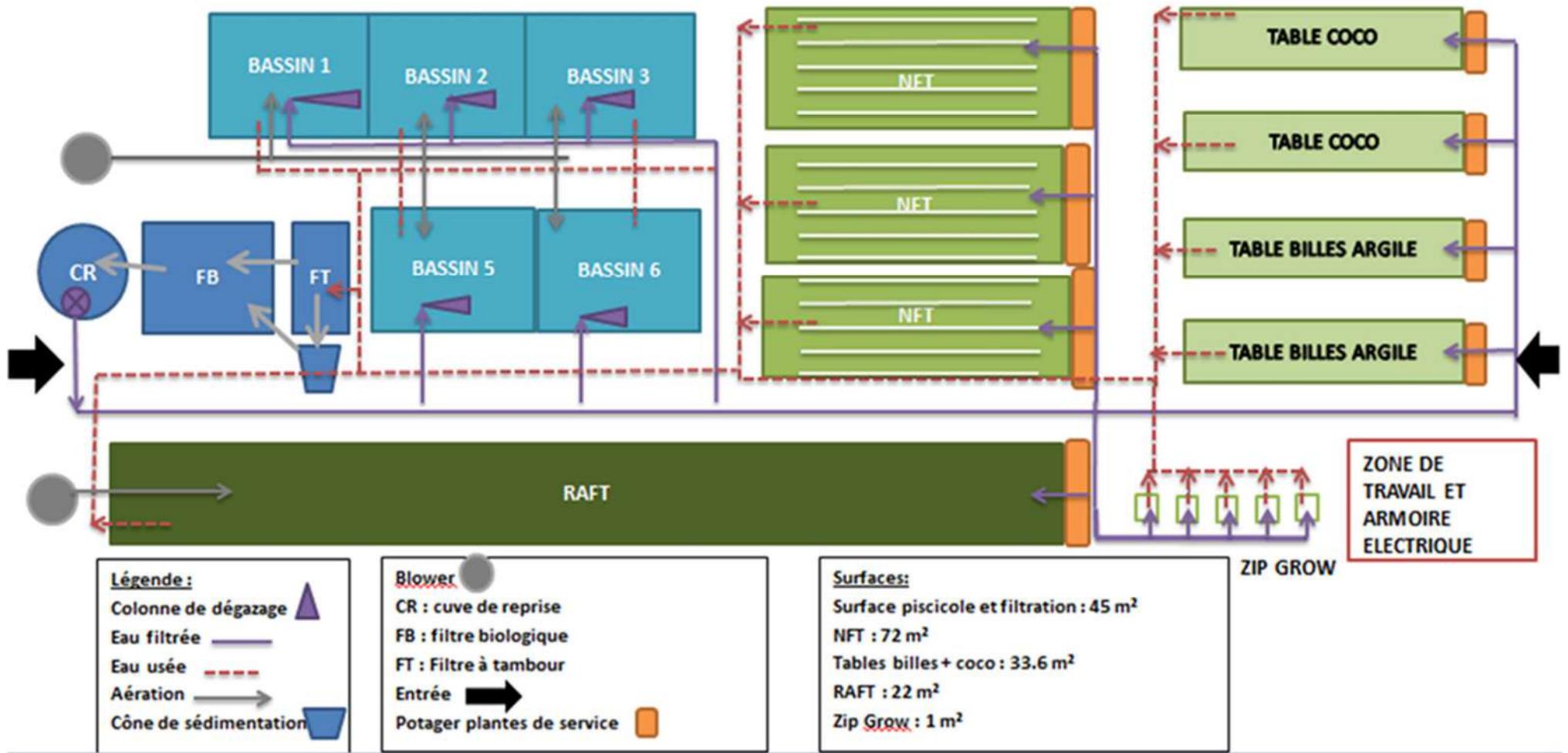


Figure 49: schéma d'agencement d'une serre d'aquaponie de 265.2 m<sup>2</sup> (Perrot, 2017)

## 5.2.2. Charges

Après les chiffres d'affaires estimés, il faut quantifier les charges pour pouvoir déterminer les rentabilités en fonction des scénarios. Ces charges se décomposent en charges fixes et les charges variables qui ont été quantifiées.

### 5.2.2.1. Charges fixes

Ces charges fixes sont des coûts qui ne varient pas selon l'activité mais qui sont supportées généralement mensuellement. Pour certaines d'entre-elles, un amortissement comptable peut être réalisé. Pour rappel, on considère que le terrain appartient déjà à l'exploitant qui en phase de diversification. Les principaux postes de charges fixes de la nouvelle serre (tableau 36 et annexe 19) concernent :

- le bâtiment qui comporte la serre avec le montage, la toile d'ombrage, l'armoire électrique etc.
- le matériel piscicole comme les bassins, les filtres, les pompes etc.
- le matériel végétal comme les supports hydroponiques
- les fournitures et petits équipement comme les kits d'analyses, les balances etc.
- les petits matériels comme les bulleurs, les épuisettes, les tuteurs etc.
- et le matériel de gestion des risques qui correspond au groupe électrogène.

Pour le projet de dimensionnement de la nouvelle serre, l'ensemble des charges fixes se monte à **60 573,6 € HT** soit **72 688,35 € TTC** (tableau 36 et annexe 17).

Des amortissements sont proposés jusqu'à dix ans pour les plus gros investissements comme la serre par exemple. Le coût annuel des charges fixes avec amortissement serait de 13 322,4€ TTC (annexe19).

Tableau 37 : principaux postes de charges fixes

Investissements	Coûts € HT	Coûts € TTC
<i>Bâtiment</i>	9 492,06	11 390,48
<i>Matériel piscicole</i>	26 255,5	31 506,6
<i>Matériel végétal</i>	20 207,04	24 248,45
<i>Fournitures et petits équipements</i>	3 168,95	3 802,74
<i>Petits matériels</i>	940,07	1 128,08
<i>Matériel de gestion des risques</i>	512,5	615
<b>TOTAL</b>	<b>60 573,60</b>	<b>72 688,35</b>

### 5.2.2.2. Charges variables

Une charge variable, charge d'activité ou charge opérationnelle, représente une charge liée au fonctionnement de l'entreprise.

Ces charges sont décomposées en plusieurs postes :

- les charges variables liées à la partie végétale,
- les charges variables liées à la partie piscicole,
- les charges variables liées à l'eau et à l'électricité,
- les charges variables liées au temps de travail.

#### - Charges variables partie végétale

Les coûts concernent l'achat des espèces végétales cultivées (jeunes plants et graines), les plantes de services, les nutriments rajoutés ainsi les analyses d'eau. Ces charges variables représentent à l'année 2 083,1€ HT soit 2 499,72€ TTC (annexe 16).

<b>TOTAL CHARGES VARIABLES VEGETALES (€ HT)</b>	<b>2 083,1</b>
---	----------------

#### - Charges variables partie piscicole

Les coûts concernés correspondent à l'achat des poissons et de l'aliment. Ils vont être différents selon les quatre scénarios identifiés (cf. 5.1.2) allant de 11 286,18€ HT soit 13 543,42€ TTC pour le scénario B à 13 897,11€ HT soit 16 676,53€ TTC pour le scénario C (tableau 36 et annexe 7).

Tableau 38 : charges variables partie piscicole

<u>Charges variables sur l'année € HT</u>		<u>N.B : Définition des scénarios</u>
Scénario A	13 459,28	A : Truites de 70g et Sandres de 10 g
Scénario B	11 286,18	B : Truites 70 g et Sandres de 200g
Scénario C	13 897,11	C : Truites de 300 g et Sandres de 10g
Scénario D	11 724,00	D : Truites de 300g et Sandres de 200g

#### - Charges variables liées à l'eau et à l'électricité

L'eau utilisée dans le circuit est de l'eau du réseau. Deux remplissages annuels de l'ensemble du circuit sont prévus ainsi que les compensations liées à l'évaporation essentiellement estivale. Les charges variables sont estimées annuellement à 2 931,31€ HT (tableau 37).

Pour l'électricité, l'énergie utilisée pour le fonctionnement des pompes et des balances est prise en compte. Les charges variables sont estimées annuellement à 2 532,9€ HT (tableau 38).

Tableau 39 : charges variables eau et électricité

Prix de l'électricité : 0,34€						
	Nombre	Puissance (kW)	Temps de fonctionnement (h/j)	KW/j	kW/an	Coût annuel (€)
Pompe à eau	1	1,5	24	36	12 960	1 877,9
Pompe à air 200	1	0,279	24	6,966	2 410,56	349,3
Pompe à air 150	2	0,12	24	5,76	2 073,6	300,5
Balance électrique	1	0,1	1	1	36	5,2
<b>TOTAL(€HT)</b>						<b>2 532,9</b>

	Volume / an (m <sup>3</sup> )	Coût de l'eau (€ HT/m <sup>3</sup> )	Coût annuel € HT
Remplissage circuit 2 fois / an	84,2	3	252,6
Consommation entretien / jour	116,07	3	348,21
Evaporation / jour (5% volume total)		3	2 299,5
<b>TOTAL</b>			<b>2 900,31</b>

*- Charges variables liées au temps de travail*

Le temps de travail est considéré dans cette étude comme une charge variable. Le temps de travail est un paramètre difficile à estimer compte tenu du type d'activité.

Le temps a systématiquement été quantifié chaque jour pour toutes les tâches effectuées pendant la durée de l'expérimentation. D'après les temps de travaux effectués dans la serre pilote, selon les mois et selon l'unité concernée, le temps de travail correspondant à la nouvelle serre dimensionnée a été estimé sur le principe de la proportionnalité.

Le temps de travail pour notre serre dimensionnée s'élève à une moyenne de **65.6 h / mois**. A noter que ces temps ne concernent que la production dans la serre et non le travail administratif ni la commercialisation.

Les données disponibles montrent que le temps de travail accordé au compartiment piscicole est plutôt constant. Une présence régulière, qui est en général courte, est nécessaire. Le travail sur ce compartiment n'est pas dépendant des périodes de l'année. A l'inverse, le compartiment végétal demande un suivi et un travail beaucoup plus soutenus en période estivale. Ce compartiment nécessite moins de présences régulières que pour la partie poisson mais le temps consacré est plus conséquent. A noter aussi que le temps de travail en été est beaucoup plus important qu'en hiver, jusqu'à plus de 100 h/mois (tableau 38).

Les mois de transition entre les cycles (avril et octobre) demandent également un temps de travail plus important. C'est effectivement la période de transfert des poissons et des plantations des nouvelles cultures végétales ce qui suppose aussi un important travail de nettoyage.

Les charges variables travail sur la base d'un SMIC se montent à 10 401,5€ HT (tableau 41).

Tableau 40 : temps de travaux par mois et selon les compartiments de la serre projet d'après les données du pilote

Serre dimensionnée (m <sup>2</sup> )	Poisson	Végétal	Heures
Janvier			30,74
Février			26,35
Mars	15,97	44,31	60,28
Avril	19,96	87,43	107,39
Mai	25,55	75,85	101,40
Juin	27,15	73,85	101,00
Juillet	33,53	64,83	98,37
Août	33,53	64,83	98,37
Septembre			47,91
Octobre			32,74
Novembre			49,50
Décembre			32,74
<b>Total (h)</b>	155,69	411,11	<b>786,8</b>
<b>Moyenne / mois (h)</b>	<b>25,95</b>	<b>68,52</b>	<b>65,56</b>

Tableau 41 : charges variables temps de travail

Smic (€ / mois)	1 628,3
Charges patronales (€ / mois)	105,3
<b>TOTAL (€ / 6 mois)</b>	<b>10 401,5</b>

Dans le projet de serre, le temps de travail pourrait nécessiter un mi-temps à l'année ou un plein temps en période estivale et sur les mois de transition soit d'avril à octobre. Ainsi cette activité pourrait venir en complément d'une activité de pisciculture en étang.

*- Synthèse des charges variables selon les scénarios*

L'ensemble des charges variables atteignent environ 30K€ pour autant leurs répartitions varient selon les scénarios (Figure 50). Dans les scénarios A et C, les achats d'animaux pèsent entre 38 et 39 % de l'ensemble des charges soit près de 10 points de plus que les deux autres scénarios. Le coût des petits sandres contribue à hauteur de 94 % (scénario C) à 97% (scénario A) du coût total des poissons. Dans les scénarios B et D, le poids des achats d'aliments est nettement supérieur aux deux autres scénarios. La biomasse et taille initiale de sandres de 200g en vue d'atteindre une taille marchande se traduit pas un nourrissage plus intensif des poissons. Le coût des aliments est ainsi deux fois plus élevés (environ 2 700€) que dans les scénarios A et C (environ 1 300€).

Nous notons également que le système aquaponique basé sur un système en circuit fermé nécessite un coût énergétique non négligeable à hauteur de 17-18% de l'ensemble des charges variables.

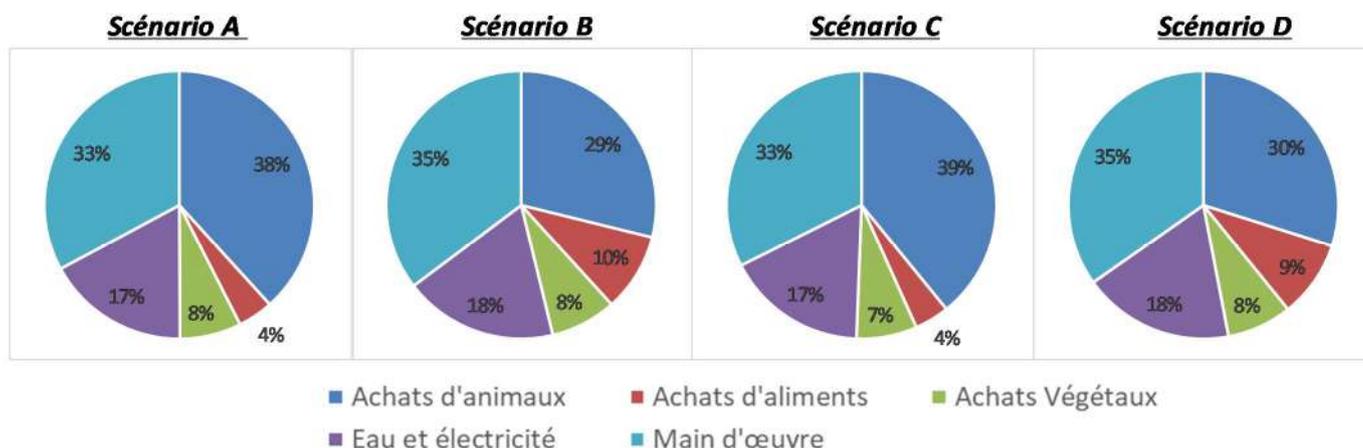


Figure 50 : répartition des charges variables selon les scénarios

### 5.3. Rentabilités selon les scénarios

Pour rappel, les quatre scénarios sont dépendants des espèces piscicoles produites lors des cycles estivaux et hivernaux. La rentabilité de chaque scénario est appréciée à partir de la différence entre l'ensemble des charges décrites précédemment et le chiffre d'affaires.

La répartition du chiffre d'affaires végétal, selon les scénarios, diffère de celle annoncée lors de la première phase d'OPRA (50%). La grande partie du chiffre d'affaires annuel est réalisé en période estivale soit 85% et non 70% comme annoncé lors de la première phase d'OPRA (tableau 42).

Tableau 42 : Répartition du chiffre d'affaires annuel sur les 2 cycles

	(€ HT)	% par rapport au CA total
CA HIVER	20 378,09	15,23%
CA ÉTÉ	113 394,92	84,77%

La décomposition du chiffre d'affaires global en fonction des productions végétales et piscicoles souligne l'importance des ventes de végétaux (entre de 54% à 77% du total du CA). Néanmoins, les options relatives aux choix des espèces de poissons et à leur taille initiale influencent fortement les recettes finales.

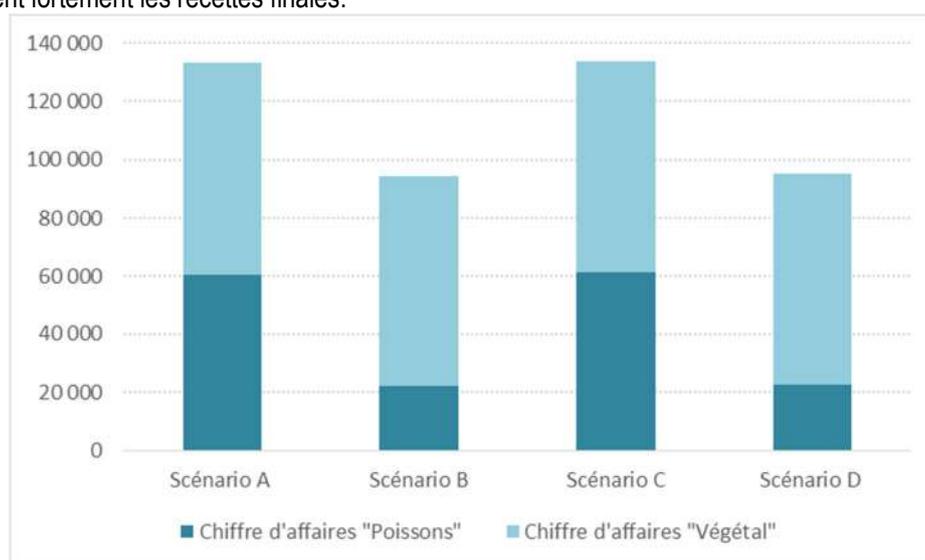


Figure 51 : répartition du chiffre d'affaires végétal et poisson selon les scénarios

Pour rappel, le choix du sandre s'est effectué en raison des débouchés importants dans la région des Pays de la Loire, que ce soit au niveau intermédiaire (ventes entre pisciculteurs) ou au niveau de la consommation finale. Les prix de vente aux différents stades de commercialisation (du juvénile à la taille adulte) sont également un facteur clé dans le niveau du CA atteint.

Quel que soient les scénarios envisagés, le chiffre d'affaires total couvre l'ensemble des coûts recensés (tableau 42).

Tableau 43 : résultat courant avant impôts de l'activité (€ HT) (Activités piscicoles et végétales confondues)

	Résultat (€ HT)	% de la moyenne
Scénario A	90 175,9	1,25
Scénario B	53 696,1	0,75
Scénario C	90 389,2	1,25
Scénario D	53 909,3	0,75
Moyenne des scénarios (€ HT)	72 042,6	1

Les scénarios A et C montrent une rentabilité supérieure aux deux autres scénarios avec un revenu environ 25% plus important à la moyenne de l'ensemble des scénarios même si les coûts de production sont un peu plus élevés (tableau 37). Il est ainsi préférable de choisir d'élever des sandres de petits calibres en été (10 à 50g) pour atteindre la meilleure rentabilité (figure 52). En revanche, le choix des truites n'est pas un facteur déterminant pour la rentabilité (scénarios A et C puis B et D très proches).

ÉTÉ		HIVER	
 Espèce : <i>Sandre</i> Calibre : Petit, environ 10 g au départ Argument : Facilité d'approvisionnement		 Espèce : <i>Truite Arc en Ciel</i> Calibre : Gros, environ 300 g au départ Argument : Demande plus forte Conduite d'élevage plus facile, plus robustes	
			
<p><b>NFT</b></p> <p><u>Menthe</u> 75% Maroc <u>Persil</u> Frisé <b>Apport</b> : Facile, diversification</p> <p><u>Fraises</u> 33% <i>Mara des Bois</i> <i>Charlotte</i> <i>Bounty</i> <b>Apport</b> : Cycle complet Meilleurs rdts sur NFT, valeur ajoutée</p> <p><b>Billes d'argiles</b></p> <p><u>Tomate grappe</u> Plus tardive que Matina <b>Apport</b> : Valeur ajoutée</p>	<p><b>RAFT</b></p> <p><u>Basilic</u> 75% <i>Grand vert</i> 15% <i>Autre (divers)</i> <b>Apport</b> : Bons rdts, facile</p> <p><u>Laitue</u> Bafana <b>Apport</b> : Diversification</p> <p><b>PDC</b></p> <p><u>Ciboulette</u> Commune <b>Apport</b> : Facile</p> <p><u>Tomate cerises</u> 60% <i>Principe Borghese</i> 40% <i>Golden Cherry</i> <b>Apport</b> : Diversification</p>	<p><b>Zip Grow</b></p> <p><u>Blettes</u> <b>Apport</b> : Facile, diversification</p> <p><b>Tapis de Coco</b></p> <p><u>Cresson</u> <i>Fontaine à larges feuilles</i> <b>Apport</b> : Facile, diversification Bons rdts</p> <p><b>RAFT</b></p> <p><u>Laitue</u> Bafana <b>Apport</b> : Facile, diversification</p>	<p><b>Billes d'argiles</b></p> <p><u>Poireaux</u> <b>Apport</b> : Valeur ajoutée</p> <p><b>PDC</b></p> <p><u>Ciboulette</u> Commune <b>Apport</b> : Facile</p> <p><u>Chou feuille Kale</u> <b>Apport</b> : Diversification Récolte continue</p> <p><u>Chou Fleur Romanesco</u> <b>Apport</b> : Diversification</p> <p><b>Jardinières</b></p> <p><u>Radis</u> <b>Apport</b> : Diversification</p>

Figure 52 : récapitulatif des choix d'espèces pour le dimensionnement de la serre projet

## 6. Discussion

### 6.1. Limites de l'expérimentation

L'étude OPRA2 a montré certaines limites sur le pilote et sur les protocoles.

#### 6.1.1. Pilote

La serre pilote a d'abord été conçue dans un but pédagogique. L'étude OPRA avait pour objectif d'optimiser cet outil d'un point de vue technico économique. Cependant, certaines contraintes n'ont pu être effacées comme par exemple la hauteur utile. Cette dernière, 2,2 mètres était trop faible pour les tomates par exemple, limitant fortement les rendements. Une hauteur sous serre de 4 à 5 mètres est recommandée pour permettre une meilleure répartition du plant dans le gradient thermique (PNTTA, 1999). De plus, les tomates appartiennent aux plantes de cultures « hautes », ainsi, le nombre de bouquet floraux, susceptibles de fournir des fruits dépend de cette hauteur.

Les caractéristiques basiques de l'outil font qu'il est fortement soumis aux variations climatiques en particulier de température, ce qui rend difficile la régularité des rendements. Même si plusieurs aménagements ont été réalisés comme les portes grilles, la mise en place de bâche etc., l'impact sur les rendements a été important. Des tests statistiques (non paramétriques – Test Spearman) confirme l'effet de la température pour chacune des variétés testées (Benoit, 2016 - annexe 13 ).

La lumière est un facteur fondamental pour la photosynthèse des plantes. Les variations de la luminosité notamment pendant les périodes de transitions ont affecté les rendements. La mise en place de lumières artificielles types LED avec des longueurs d'onde adaptées en hiver et pendant les périodes de transition pourrait améliorer le rendement et donc le chiffre d'affaires.

#### 6.1.2. Récoltes

Les résultats de rendements obtenus ne sont pas optimisés car il existe un effet du manipulateur qui ne peut pas être quantifié ici. Il n'y a pas eu de protocole de récolte défini. Les récoltes ne sont donc pas optimisées. Par exemple, par rapport au risque de pourriture, la pression de récolte pour les plantes feuilles n'a pas été la même que celle pour les fruits. A l'avenir pour une prochaine étude, un « protocole de récolte » devrait être mis en place. Dans son étude sur le basilic, Rackocy,*et al.*, 2004 propose une récolte du basilic à une hauteur de 15 cm tous les 28 jours.

#### 6.1.3. RTA

Le Rapport des taux d'alimentation est délicat à utiliser. La valeur de cet indicateur n'est pas fixe et dépend de nombreux facteurs. Par exemple, dans notre cas de figure, le renouvellement en eau par rapport à la quantité d'aliment distribuée, reflétant le degré d'ouverture du système, n'a pas été pris en compte en raison de différents problèmes techniques conduisant à d'importantes pertes en eau (cf. 4.1.3.2). Le renouvellement en eau est un des facteurs déterminant pour maintenir l'équilibre entre le compartiment végétal et piscicole.

De plus, cette méthode est dépendante du type d'espèce, du taux de rationnement associé et donc de la température d'élevage. Les résultats affichés dans cette étude ne sont donc pas extrapolables à tous les types d'élevage. Ils respectent aussi des conditions bien spécifiques.

Le RTA est à considérer comme un indicateur d'équilibre entre les deux compartiments qui a permis de dimensionner notre compartiment piscicole. Il reflète surtout l'extrême importance du suivi en aquaponie, que ce soit des poissons, du végétal ou de la qualité d'eau, pour le réajustement des teneurs en nutriments.

#### 6.1.4. Influence de l'hypothèse économique initiale

Effectuer l'étude économique d'une activité aquaponique s'est avéré complexe car il existe de nombreux moyens de conduire cette activité. Beaucoup de paramètres interviennent comme le choix des espèces, la diversité des cultures, le climat, les prix du marché ainsi que le niveau de technicité voulu.

Le résultat économique dépend fortement des choix initiaux qui sont réalisés et peuvent ainsi fortement varier. L'hypothèse de départ s'est portée vers un complément de revenu économique d'une activité principale d'un aquaculteur ou d'un horticulteur/maraîcher. Ainsi, la taxe foncière n'a pas été prise en compte, considérant que le terrain était déjà acquis. Certaines charges n'ont pas été retenues telles que les charges liées à la gestion administrative (notamment le temps de passation et de réception des commandes, le temps de commercialisation). Le coût des assurances, abonnements, les impôts ne sont pas

également intégrés dans les coûts. Il convient donc de rester prudent quant à l'interprétation des résultats économiques finaux qui demeurent une première évaluation qu'il faudra consolider à l'avenir avec l'acquisition de données. A noter que les subventions ou aides publiques potentielles n'ont pas été prises en compte dans les calculs de rentabilité (cf. 6.5).

De même, selon l'activité principale de l'entrepreneur, qu'il soit horticulteur, maraicher ou pisciculteur, le matériel biologique et les équipements déjà disponibles au sein de son établissement peuvent influencer le montant des investissements initiaux à réaliser et les charges à supporter. Ainsi, l'étude propose une première évaluation de la rentabilité de l'aquaponie pour certains scénarios qui sont loin d'être exhaustifs. Les calculs proposés n'intègrent pas encore la sensibilité des résultats de l'entreprise aux aléas. Or ces derniers sont nombreux (cf. point 6.2.4). Toute variation des quantités produites (en lien par exemple avec les températures, des prédateurs, des maladies) ou des prix de marché influence directement la rentabilité de l'activité. Un approfondissement de l'analyse de la distribution des résultats en fonction de différents impacts devrait permettre une meilleure lisibilité des risques financiers potentiels et des stratégies d'adaptation à mettre en œuvre par les professionnels pour y faire face.

## 6.2. Limites de l'aquaponie « Low cost »

### 6.2.1. Rentabilité

Le premier intérêt d'une unité aquaponique « low cost » est son faible coût d'investissement. Si le pilote est bien dimensionné, le coût de fonctionnement peut être aussi limité. Mais c'est une hypothèse économique qui s'intègre assez bien dans un cadre de complément de revenu économique avec un outil qui fonctionnerait essentiellement 6 mois de l'année. Les variations de températures parfois importantes ne permettent pas d'optimiser les élevages et les cultures qui pourraient permettre de rentabiliser davantage l'outil pour générer un chiffre d'affaires suffisant pour couvrir un ETP à l'année. Une plus grande surface de production pour améliorer le chiffre d'affaires génèrerait plus de coût de main d'œuvre. Pour minimiser cet impact thermique, il faudrait investir dans un outil plus sophistiqué.

De même, le volet végétal est assez chronophage et représente donc un coût. Pour diminuer le coût de main d'œuvre, il faudrait diminuer les tâches et donc investir dans des systèmes les plus « autonomes » possibles, par exemple en privilégiant certains supports hydroponiques plus simples à gérer comme des systèmes polyvalents. Le choix des espèces est aussi primordial.

### 6.2.2. Périodes de transition

La gestion des périodes de transition est aussi un facteur limitant. Il y a deux périodes printanières et automnales qui correspondent aux changements d'espèces entre le cycle hivernal et le cycle estival. Cependant, la période de transfert des poissons n'est pas forcément la même que celle de transfert des végétaux. Le choix des espèces végétales doit tenir compte de la fin des périodes de récolte afin d'optimiser la période de transition.

Les contraintes de production piscicole peuvent être aussi problématiques pendant les périodes de transition comme les problèmes de biomasse suffisantes, la surveillance du cheptel, les modifications brutales de certains paramètres physico-chimiques et les éventuels traitements sanitaires.

### 6.2.3. Aspects « couplage/découplage » du circuit d'eau

Le pilote OPRA est un système couplé, c'est-à-dire comprenant un seul circuit d'eau alimentant aussi bien les poissons que les végétaux. Le principal inconvénient provient de la dépendance totale entre les trois compartiments avec le traitement de l'eau, ce qui ne permet pas d'optimiser les rendements. Par exemple, le pH optimum pour l'assimilation des nutriments par les plantes est plutôt acide alors que le pH optimum de fonctionnement du filtre biologique est plutôt basique.

De plus, cette configuration limite fortement l'emploi de produits de traitements même biologiques sur les poissons et/ou sur les plantes.

Les systèmes découplés sont plus récents et plus sophistiqués. Les compartiments aquacoles et hydroponiques ne sont plus totalement dépendants. Ils peuvent être découplés ou couplés selon les besoins (Figure 53 : schémas de différents systèmes aquaponiques découplés (source : *aquaculture magazine*)).

Le principal avantage est de pouvoir optimiser les rendements des végétaux, notamment en augmentant l'électroconductivité. De même, l'équilibre recherché dans un système couplé entre les compartiments aquacoles et végétaux est moins problématique. En théorie, ces systèmes permettraient d'augmenter la production piscicole (Foucard *et al.*, 2015). La mise en place de traitements est aussi rendu plus facile. C'est donc un système plus souple mais plus sophistiqué.

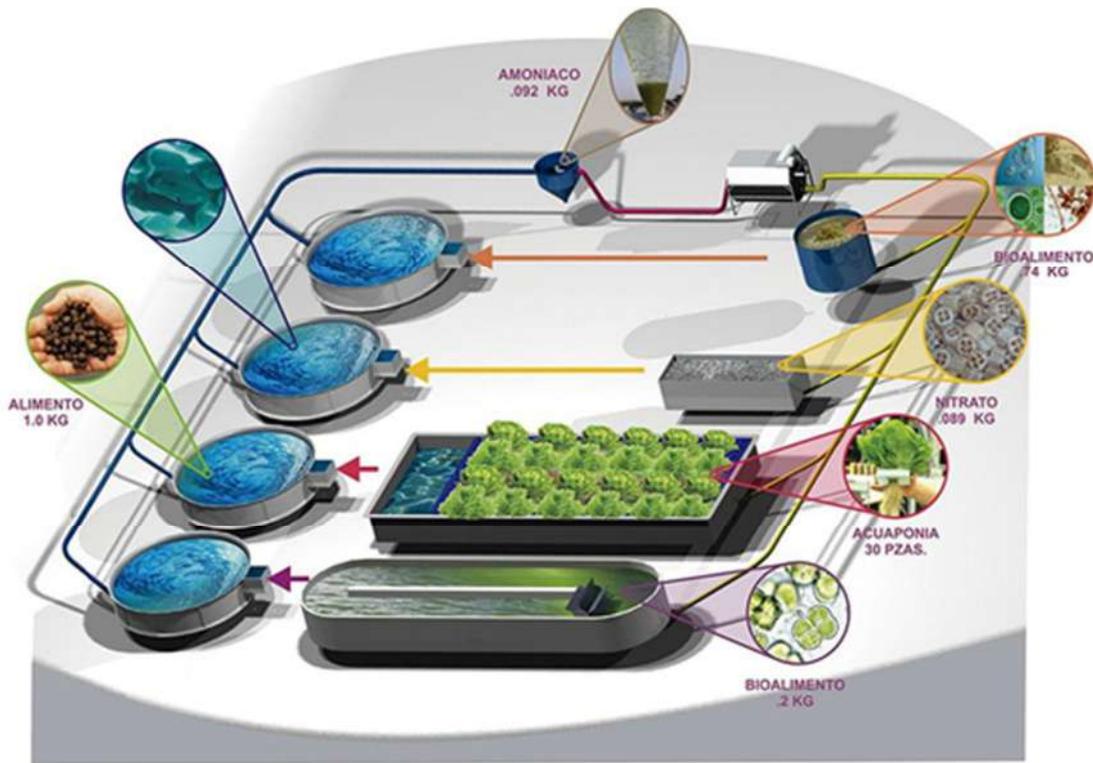


Figure 53 : schémas de différents systèmes aquaponiques décentralisés (source : *aquaculture magazine*)

Il faut quand même rester prudent sur la durée du « découplage » car certains résultats de rendements végétaux sont en partie dus aux interactions « poissons, végétaux, bactéries ». C'est un écosystème à part entière qui se met en place avec un équilibre assez fragile entre les différents compartiments. De même, les poissons et les végétaux semblent avoir été moins sensibles à certaines pathologies malgré des conditions d'élevage et de culture plutôt défavorables. Une étude en cours en Belgique semblerait montrer un effet « protecteur » de certaines communautés microbiennes liées notamment aux biofiltres (Raulier *et al.*, 2018). Le sujet mérite des travaux spécifiques car les enjeux pourraient être très importants pour la filière maraîchère.

#### 6.2.4. La gestion des aléas

Les aléas en aquaponie sont multiples et sont d'autant plus importants que le système est artisanal. Trois grands types de risques peuvent être définis, les risques liés à l'entreprise, les risques liés à la commercialisation et les risques liés à l'environnement (Le Bihan & Trintignac, 2016). Ce présent chapitre ne va concerner que la partie environnementale.

Avec une unité aquaponique « low cost » plusieurs facteurs doivent être pris en compte comme les variations des conditions climatiques, les pannes électriques, les vols et autres dégradations (annexe 20).

##### - Variations climatiques

Ces unités artisanales sont dépendantes des facteurs climatiques dont principalement la température. La mise en place de mesures permettant de diminuer les variations thermiques est indispensable. Celles testées lors de l'étude OPRA ont prouvé leur efficacité mais leurs effets cumulés n'étaient pas encore suffisants. Pour le futur site expérimental, les efforts se porteront d'une part sur la serre elle-même avec la mise en place d'une bâche thermique double paroi avec une aération plus efficace et d'autre part sur « l'eau » qui peut constituer un excellent tampon thermique. Concrètement, le volume d'eau présent dans la serre sera fortement augmenter par le développement de certains supports hydroponiques comme le raft et par la mise en place de réserve d'eau semi enterrée.

### - Pannes électriques

L'expérience montre que les incidents électriques arrivent souvent au mauvais moment, ce qui peut provoquer la perte de l'ensemble du cheptel aquacole en très peu de temps. La présence d'un groupe électrogène assurant le relais en cas de panne électrique est indispensable dans un module aquaponique commercial.

### - Vols et dégradations

C'est un facteur qui est souvent sous-estimé. Le pilote OPRA aura connu quatre « visites » avec vols et/ou dégradations en un peu plus de 2 ans et ce, malgré un positionnement géographique de la serre plutôt favorable, à savoir au milieu du Lycée professionnel invisible de l'extérieur. L'accès est d'autant plus facile que le pilote se voulait artisanale. Les vols ont aussi bien concernés le vivant (poissons et plantes) que le matériel. La mise en place en période estivale d'une grille à l'entrée de la serre avec cadenas a permis de diminuer fortement ce phénomène. Avec une unité commerciale, l'installation d'un système d'alarme semble indispensable.

## 6.3. Valorisation des boues

Une première approche sur la valorisation des boues est effectuée afin de répondre à l'objectif de rentabiliser l'activité.

Pour cela, deux systèmes sont étudiés : un système de valorisation mécanique et un lombricompostage des effluents.

La première étape consiste donc à évaluer la quantité de boues produites afin de pouvoir estimer les dimensions du système permettant de les traiter au mieux dans les deux cas précédents. Les quantités de boues engendrées par le pilote n'ont pas été mesurées. Les estimations se sont faites à partir notamment de la méthode du CEMAGREF avec la formule ci-dessous (Cormorèche & Gadenne, 2002).

$$Q.MES = (33x IC - 20) x (\text{quantité d'aliment distribué}/100)$$

$$Q.MES = (33x IC - 20) x (\text{quantité d'aliment distribué}/100)$$

Q = Débit

MES = Matière en suspension

IC = Indice de conversion

### 6.3.1. Valorisation mécanique

Le système de valorisation mécanique consiste à la mise en place d'un circuit à la suite du filtre à tambour pour récupérer, traiter et flocculer les boues afin qu'elles soient également utilisables en tant que fertilisant pour l'agriculture (figure 53). Le concept consiste à flocculer les boues récupérées après décantation afin de les rendre plus compactes et de pouvoir ensuite les faire sécher dans des sacs pour récupérer la matière sèche. (Labbé L., 2012)

Ce mode de fonctionnement est similaire que celui de la station RATHO qui fait partie du programme national aquaponique APIVA (P. Foucard, com. pers., juillet 2017)

Des truites à une densité de 25 kg / m<sup>3</sup> maximum, nourries à un taux de rationnement d'environ 1% permettraient de produire 1 m<sup>3</sup> de boues en l'espace de quatre mois. Dans nos conditions d'élevage, un peu moins de 2 m<sup>3</sup> de boues d'élevage sur le cycle truite pourraient être produites.

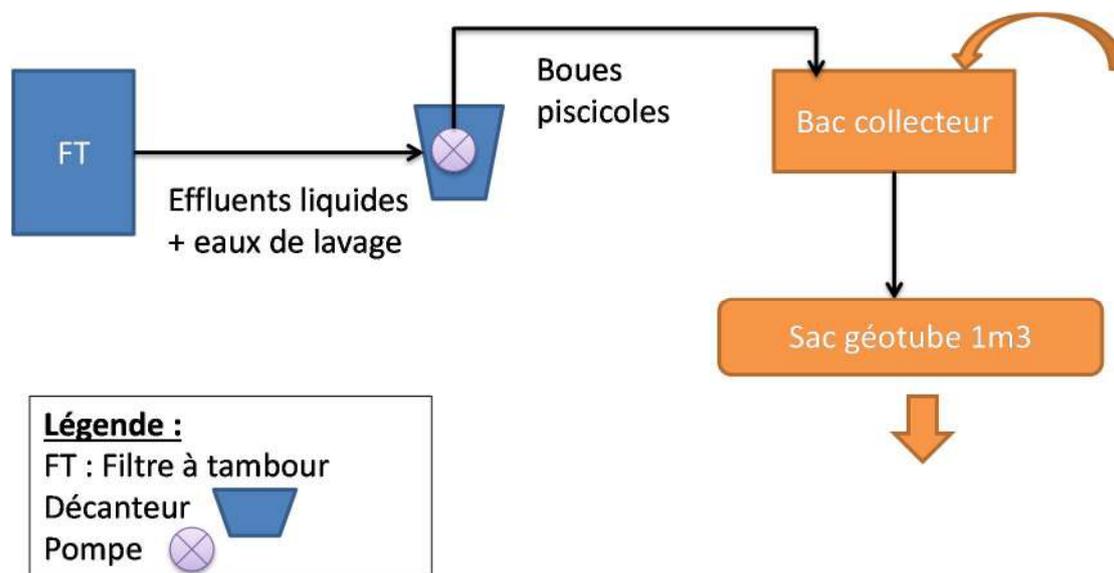


Figure 54 : schéma de principe de la mise en place d'un système mécanique de traitement des boues piscicoles (Perrot, 2017) et Foucard, com. Pers., juin 2017

En été, les sandres avec une densité d'élevage maximale de  $40 \text{ kg/m}^3$ , nourris à un taux de rationnement d'environ 2% produiraient environ  $1 \text{ m}^3$  de boues en deux mois, soit un peu plus de  $2 \text{ m}^3$ .

Cela reste un ordre de grandeur car les densités d'élevage ne sont pas constantes dans notre pilote et la production des boues dépend de multiples facteurs. Une étude plus précise sur l'estimation des boues piscicoles devra être effectuée pour améliorer cette analyse.

Ces premières estimations montreraient que l'outil redimensionné produirait environ  $4 \text{ m}^3$  de boues piscicoles par an, pouvant être valorisé en compost. Les investissements nécessaires seraient de **1 277 €** en sachant que le filtre à tambour et le décanteur ont déjà été compris dans nos achats de la serre dimensionnée (annexes 17 et 18).

### 6.3.2. Lombricompostage

Concernant le lombricompostage, le principe repose sur la transformation des déchets organiques par les vers de terre, *Eisenia foetida*. Ces derniers permettent, dans de bonnes conditions, une transformation rapide et efficace de ces boues en terreau appelé lombricompost qui constitue un excellent amendement pour le sol (figure 54). L'idée est donc d'avoir un milieu adapté pour l'activité des vers et un bon dimensionnement du système par rapport aux boues produites. L'avantage du lombricompostage par rapport à d'autres systèmes est qu'il ne produit pas d'odeurs, réduit de 30% la masse de déchets et ne nécessite pas d'aération supplémentaire en plus d'avoir un fumier de vers final de qualité (Leporho, 2015). Attention aux limites d'efficacité du lombricompostage quand les températures sont froides.

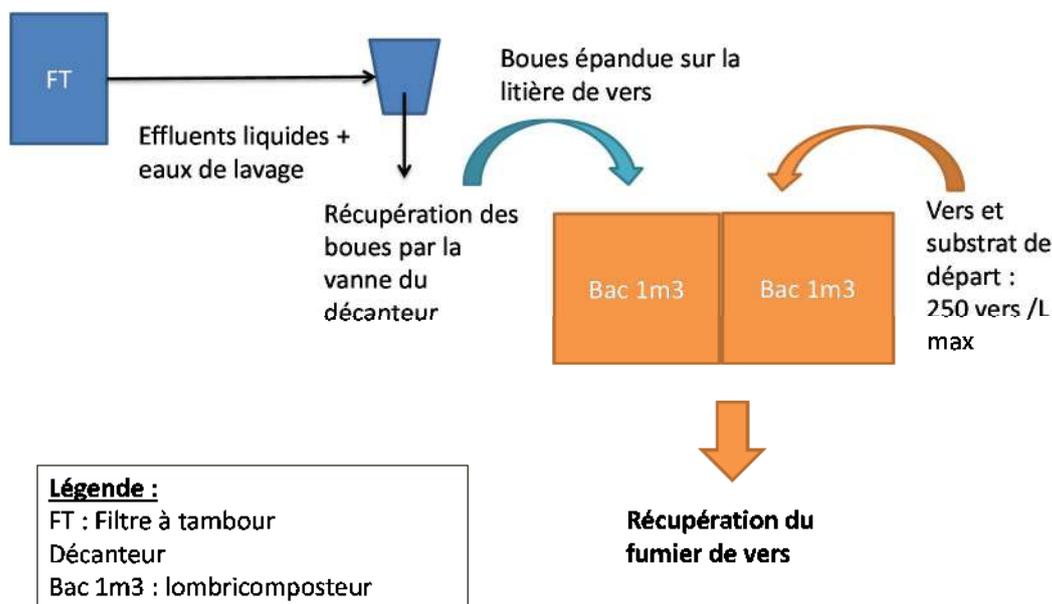


Figure 55 : schéma de principe d'un système de traitement de lombricompostage (Perrot, 2017)

La récupération des boues du décanteur permettra d'alimenter les bacs de lombricompostage, composés initialement des vers *Eisenia foetida* et *Eudrilus eugenia* qui se reproduisent très bien dans ces conditions, installés dans de la litière spécifique optimisant leur développement. La population de vers s'autorégule, il faut considérer une densité maximale de 250 vers / L de litière (Leporho, 2015).

Pour le moment, des bacs de 1m<sup>3</sup> chacun pourraient être redimensionnés lorsque la quantité de boues sera précisément estimée. deux bacs seraient mis en place afin d'avoir un système en continu, car il faut normalement un temps de 4-5 jours avant de réutiliser un bac qui a reçu les boues piscicoles (Leporho, 2015). Le matériel nécessaire coûte environ 210 € (annexe 18).

Les produits issus de chacun de ces systèmes pourraient être vendus en tant qu'engrais naturel ou lombricompost. Le prix est difficilement estimable car il dépend de la qualité du produit et donc de la quantité de matière sèche. En moyenne, le lombricompost en vrac se vend à environ 100 € HT la tonne (Gillot & Sigier, 2002).

Même l'analyse reste approximative, un système de lombricompostage coûtera certainement moins cher qu'un système mécanique. La rentabilité de ces systèmes sera réellement étudiée lorsque la quantité d'engrais sera établie pour chacun d'eux.

Ce type de système demande donc un investissement et de l'espace supplémentaire dans la serre, notamment pour le système mécanique qui doit être relié au décanteur alors que le lombricomposteur peut en être séparé. Le système de lombricompostage sera plus facilement intégré à une serre déjà existante.

#### 6.4. Réglementation

La réglementation est un paramètre très important à prendre en compte pour tous projets économiques en aquaponie. Même si c'est un nouveau mode de production en hors sol sans lien avec le réseau hydrographique et sans produits chimiques, certains textes réglementaires s'appliquent indépendamment des règles d'urbanisme qui prévalent pour toute infrastructure de type agricole. Ces textes concernent principalement le sanitaire avec des préconisations différentes entre la production animale et végétale.

## 6.4.1 Production piscicole

### 6.3.1.1. AZS

La mise sur le marché d'animaux d'aquaculture avec ou sans but lucratif est une activité soumise à l'obtention d'un agrément zoosanitaire dès lors qu'elle entraîne un risque de propagation des maladies des animaux aquatiques comme le définit la Directive Européenne 2006/88/CE du 24 octobre 2006 relative aux conditions de police sanitaire applicables aux animaux et aux produits d'aquaculture, et à la prévention de certaines maladies chez les animaux aquatiques et aux mesures de lutte contre ces maladies. Il y a un dossier à monter auprès des services de la DDPP afin d'obtenir cette autorisation nécessaire pour commercialiser du poisson destinées à la consommation humaine, à la pêche de loisirs ou au repeuplement. Seules les productions de poissons d'ornements d'eaux chaudes (vivipares par exemple) ont sont exemptées. A noter que dans la configuration d'une unité aquaponique, le dossier reste simple à faire car les productions aquacoles ne sont pas en contact direct avec le réseau hydrographique. Deux sites aquaponiques régionaux ont fait l'objet d'une démarche d'AZS. Un troisième site sera instruit prochainement.

### 6.3.1.2. Iota et/ou installations classées

Selon les cas de figure, les projets aquaponiques à vocation commerciale peuvent être concernés par des textes liés à la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques avec les Iotas ou liées aux installations classées.

Les productions de poissons supérieures à 20 tonnes par an sont concernées par les installations classées et doivent donc relever de l'Autorisation Environnementale. C'est une procédure instruite par la DDPP du département. C'est un dossier à monter sur le projet avec au minimum une notice d'incidence et pouvant aller jusqu'à l'étude d'impact avec enquête publique selon les cas.

Aujourd'hui aucun projet aquaponique commercial en France n'a relevé de ces prérogatives pour le moment.

Pour les productions inférieures à 20 tonnes, le projet peut échapper aux textes réglementaires « Loi sur l'eau » à l'exception de ceux qui utiliseraient des forages. Le projet serait soumis à déclaration pour un volume d'eau de forage prélevé compris entre 10 000 m<sup>3</sup> à 200 000 m<sup>3</sup> par an. C'est une procédure instruite par la DDT du département

### 6.3.1.3. Espèces produites

Les espèces présentes dans une liste nationale officielle relevant de l' Arrêté du 17 décembre 1985 fixant la liste des espèces de poissons, de crustacés et de grenouilles représentées dans les eaux françaises sont autorisées à l'élevage en France sauf exceptions (exp *Acipenser sturio*, esturgeon d'Europe). Il existe aussi une liste d'espèces pouvant provoquer des déséquilibres biologiques et qui sont interdites d'élevage (exp : écrevisses américaines).

Plusieurs projets aquaponiques reposent sur la production d'espèces comme le Tilapia qui est considérée comme espèce exotique en France et en Europe. Dans ce cas, une autorisation préfectorale est nécessaire pour tout élevage d'espèces exotiques, le dossier pouvant être assez complexe. Aujourd'hui, les espèces exotiques qui peuvent faire l'objet d'autorisation sous certaines conditions sont l'amour blanc et plusieurs espèces d'esturgeons (sibériens, diamants etc.).

## 6.4.2. Production végétale

Les végétaux commercialisés restent soumis à certaines règles d'hygiène notamment liées à des critères microbiologiques, à leurs toxines et autres métabolites (cf.4.2.3.2.). Le règlement CE 2073/2005 du 15 novembre 2005 établit les critères biologiques applicables à certains microorganismes et les règles d'application que les exploitants du secteur alimentaire doivent observer lorsqu'ils mettent en œuvre les mesures d'hygiène générale.

Le règlement (CE) 1881/2006 décrit les teneurs maximales en nitrates que peuvent contenir différents légumes à feuille pour respecter la réglementation sanitaire en termes de contaminants.

## 6.5. Aides à l'investissement

Ce paragraphe ne va concerner que les aides à l'investissement. L'aquaponie n'est pas considérée comme de l'Aquaculture MultiTrophique Intégrée (AMTI) car le système repose sur des cultures et des élevages en hors sol et les végétaux produits ne sont pas des macrophytes. Elle repose donc sur l'association d'un élevage aquacole avec une production agricole, ce qui rend plus complexe les aides à l'investissement.

Pour un projet commercial, la partie aquacole est éligible au FEAMP. Cette partie peut comprendre la serre, les bassins aquacoles, l'unité de filtration et tout le circuit hydraulique. L'aide peut se monter à 50% du montant HT de l'investissement avec un plancher fixé dans les Pays de la Loire à 5 000 € de travaux.

Pour la partie végétale, qui comprend principalement les supports hydroponiques, elle pourrait relever d'un autre fond européen le FEADER. Cela va dépendre des régions qui sont autorités de gestion sur ce fond européen. Pour la région Pays de la Loire, l'aquaponie n'est pas éligible pour le moment.

## Conclusion

Les résultats établis à partir du pilote expérimental OPRA ont permis d'atteindre l'objectif principal de définir un scénario compatible avec une faisabilité technico-économique de l'activité sur les deux cycles été et hiver cumulés, et de dimensionner un outil de production rentable de 265.2 m<sup>2</sup>. En effet, les trois cycles de production (1 hiver, 2 été) ont permis d'acquérir assez de recul et de résultats pour effectuer une comparaison inter et intra espèces et de choisir le meilleur scénario technique et économique sur les deux cycles été et hiver cumulés. Pour l'unité piscicole, élever des sandres de petit calibre en été pour des raisons économiques et d'approvisionnement et des truites portions en hiver pour des raisons de facilité d'élevage et de demande sur le marché. Pour l'unité végétale, on choisit pour chaque cycle de se diversifier au maximum pour attirer le consommateur et avoir un avantage par rapport aux maraichers à proximité.

Cette expérimentation a également permis de prendre en compte la complexité d'un outil aquaponique artisanal ainsi que les différents aléas qui peuvent apparaître. Ainsi, les bases du fonctionnement d'une activité aquaponique sont à disposition ainsi que des éléments de dimensionnement qui peuvent aider des acteurs économiques à se diversifier ou à monter leur propre activité aquaponique.

Cette phase expérimentale a également permis de mettre en avant la polyvalence de cette activité, qui nécessite une expertise à plusieurs niveaux. Elle a aussi montré le dynamisme régional des projets autour de l'aquaponie, Cependant, les éléments de résultats présentés dans ce rapport sont à utiliser avec précaution étant donné la multitude de facteurs influençant le bilan économique et le fonctionnement de cette activité. Les tendances sont bien identifiées et les premiers éléments de dimensionnement doivent permettre d'aider les futurs projets même si tous les éléments n'ont pas pu être pris en compte dans le bilan économique final, notamment tout ce qui concerne la commercialisation et la partie administrative d'un projet économique.

D'autres points doivent être améliorés comme tout ce qui va dans le sens d'une plus grande autonomie de l'activité et de la structure. Par exemple, la valorisation des boues abordée dans cette étude doit être poursuivie. L'autonomie énergétique va dans le sens du concept de l'aquaponie. La mise en place de panneaux solaires ou la récupération d'énergie fatale sont des sujets à travailler.

Concernant les perspectives du projet OPRA, une nouvelle serre aquaponique à vocation expérimentale et pédagogique plus opérationnelle est en cours de dimensionnement, entre autres à partir des données OPRA. Le projet théorique devrait être finalisé début 2019 pour une recherche de financement nécessaire à la construction de cette nouvelle serre aquaponique qui se ferait sur le site du Lycée Olivier Guichard de Guérande.

## Bibliographie

- Afsharipour, S., & Roosta, H. (2010). Effect of different planting beds on growth and development of strawberry in hydroponic and aquaponic cultivation systems. *Plant Ecophysiology*, 2, 61–66.
- Agreste, Pays de la Loire, D. (2015). *Mémento de la statistique agricole*.
- Agreste, P. de la L. (2012). *Portrait de l'agriculture en Pays de la Loire. Les légumes frais dans les grandes et moyennes exploitations*.
- Ameslon, P., Le Bihan, V., Lesage, C., & Trintignac, P. (2012). *Evaluation des potentialités sur le marché de l'alimentation humaine pour des produits piscicoles régionaux d'étangs*.
- Benoit, J. (2016). *Etude de la faisabilité technico économique d'un pilote d'aquaponie menée sur 2 cycles indépendants de productions saisonnières dans les Pays de la Loire*.
- Blancheton, J., Dosdat, A., & Deslous paoli, J. (2004). Minimisation des rejets biologiques issus d'élevage de poissons. In *Aquaculture et environnement* (Dossier de, p. 110).
- Blidariu, F., & Grozea, A. (2011). Increasing the Economical Efficiency and Sustainability of Indoor Fish Farming by Means of Aquaponics-Review. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*, 44, 1–8.
- Borovinšek, M., Taherishargh, M., Vesenjok, M., Ren, Z., & Fiedler, T. (2016). Geometrical characterization of perlite-metal syntactic foam. *Materials Characterization*, 119, 209–215.
- Bregnballe, J. (2010). *A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems*.
- Campeas, A. (2008). *Modélisation de l'hétérogénéité de croissance dans le système aquacole*. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Chandra, S., Khan, S., Avula, B., Lata, H., Yang, M., ElSohly, M., & Khan, I. (2014). Assessment of total phenolic and flavonoid content, antioxidant properties, and yield of aeroponically and conventionally grown leafy vegetables and fruit crops: A comparative study. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*.
- Chaux, C., & Foury, C. (2008). *Productions légumières Légumineuses potagères légumes fruits : Tome 3*. (L. / T. E. DOC, Ed.) (Agricultur).
- Cormorèche, J., & Gadenne, T. (2002). *Caractérisation des boues de salmoniculture en Rhones Alpes*.
- Crespi, V., & Coche, A. (2008). *Glossary of aquaculture/Glossaire d'aquaculture/Glosario de acuicultura*.
- Dalsgaard, A., Lund, I., Thorarinsdottir, R., Drengstig, A., Arvonen, K., & Pedersen, P. (2013). Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives. *Aquacultural Engineering*, 53, 2–13.
- DRAAF, P. de la L. (2015). *La conchyliculture en Pays de la Loire*.
- DRAAF, P. de la L. (2016). *Filières végétales en Pays de La Loire. DRAAF Pays de la Loire*.
- EIFAC. European Inland Fisheries Advisory. (2001). *Report of the Ad Hoc EIFAC/EC working party on market perspective for European freshwater aquaculture*.
- Engle, C. (2015). Economics of Aquaponics. *SRAC*, 5006, 4.
- Engle, C. . (2015). Economics of Aquaponics. *SRAC*, 5006, 4.
- English, L. (2015). *Economic Feasibility of Aquaponics in Arkansas*. University of Arkansas.
- FAO. (2014a). *Conception et installation d'un système aquaponique*.
- FAO. (2014b). *The State of the World - Fisheries and Aquaculture*.

- Fauconneau, B. (2004). Diversification, domestication et qualité des produits aquacoles. *Productions Animales-Paris-INRA*, 17, 227–2036.
- FEAP. (2015). *European Aquaculture Production Report 2005-2014*.
- Fiot, M., Gandon, J.-C., Le Bihan, V., Lesage, C.-M., & Trintignac, P. (2011). *Les conditions de pérennité et de développement de la pisciculture d'eau douce en Pays de la Loire*. Smidap - Université de Nantes.
- Foucard, P., Tocqueville, A., Goumé, M., Labbe, L., Lejolivet, C., Baroiller, J., ... Darfeuille, B. (2015). L'aquaponie, une association vertueuse des poissons et des végétaux en eau douce : synthèse technique, économique et réglementaire. *Projet APIVA*.
- FranceAgrimer. (2015). *L'horticulture ornementale Données 2015*.
- FranceAgriMer. (2018). Les filières pêche et aquaculture en France. Production, Entreprises, Échanges, Consommation. *Les Cahiers de FranceAgriMer*, 36.
- Gangenes Skar, S., Liltved, H., Rye Kledal, P., Björnsdottir, R., Homme Morten, R., Høgberget, R., ... Paulsen, H. (2015). *Aquaponics NOMA (Nordic Marine)* (New Innova).
- Gangenes Skar, S., Liltved, H., Rye Kledal, P., Björnsdottir, R., Morten Homme, J., Høgberget, R., ... Paulsen, H. (2015). *Aquaponics NOMA (Nordic Marine)*. *New Innovations for Sustainable Aquaculture in the Nordic Countries*.
- Gillot, M., & Sigier, P. (2002). *Le biotraitement des déchets par lombricompostage, Traitement et recyclage de l'eau en aquaculture*.
- Hardesty, S., & Leff, P. (2010). Determining marketing costs and returns in alternative marketing channels. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25, 24–34.
- Hinckel, F., & Louis-Sydney, A. (2017). *Analyse de projet développement durable : Redimensionnement et analyse financière d'une serre aquaponique*.
- Hochmuth, G. (2012). *Fertilizer management for greenhouse vegetables* (Horticultu).
- Hochmuth, G. (2012). *Fertilizer management for greenhouse vegetables*. (U. of L. Department, Horticultural Sciences, Ed.) (Florida Gr).
- Ifremer. (2009). *Les systèmes en circuit recirculé : intérêt et cas d'utilisation*.
- İncemehmetoglu, A. (2012). *INVESTIGATION THE EFFECTS OF DIFFERENT SUPPORT MEDIUM ON PRODUCT WITH NUTRIENT FILM TECHNIQUE*. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.
- Jones, J. (2005). *Hydroponics : a practical guide for the soilless grower*. (A. Journal, Ed.) (CRC Press).
- Jouanneau, J., & Froger, J.-M. (2010). *Référentiel des systèmes maraîchers Bio des Pays de la Loire*.
- Kestemont, P., Dabrowski, K., & Summerfelt, R. (2015). *Biology and Culture of Percid Fishes*.
- Labbé, L., Lefèvre, F., Bugeon, J., Fostier, A., Jamin, M., & Gaumé, M. (2014). Conception d'un système innovant de production de truites en eau recirculée. *INRA Prod. Anim.*, 22, 135–146.
- Laguerre, H. (2013). *Fiche EAU n°1,3 Le traitement des effluents en salmoniculture*.
- Lavenant, M., La Pomelie, C., & Paquot, E. (1995). *Aquaculture en système clos ; estimation des coûts de production pour l'élevage de bar et de turbot*.
- Laviale, R. (2015). *Expérimentation et Démonstration Aquaponique à vocation Pédagogique. Optimisation du pilote régional en Aquaponie (Pays de la Loire)*.
- Le Bihan, V., & Trintignac, P. (2016). Risques et gestion des risques en pisciculture d'étangs : le cas ligérien (p. 9). Université de Nantes Capacités Mer-SMIDAP; 5ème journée de la recherche piscicole.
- Lennard, M. (2012). *Aquaponic System Design Parameters: Fish to Plant Ratios (Feeding Rate Ratios)*.

- Leporho, J. (2015). *Faisabilité du traitement et de la valorisation des boues piscicoles par lombricompostage et/ou lombrifiltration*.
- Lorena, S., Cristea, V., & Oprea, L. (2008). Nutrients dynamic in an aquaponic recirculating system for sturgeon and lettuce production. *Zootecnie Si Biotehnologii*, 41, 137–143.
- Love, D., Fry, J., Genello, L., Hill, E., & Frederick, J. (2014). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67–74.
- Love, D., Fry, J., Li, X., Hill, E., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67–74.
- Martinez, S., & Morard, P. (2000). *Recyclage des solutions nutritives en culture hors-sol*. (ENSAT, Ed.) *Forum graine de chercheur*.
- Mc Murtry, M., Nelson, P., & Sansders, D. (1998). "Aqua-Vegeticulture Systems". *International Ag-Sieve*.
- McIntyre, A. (2014). L'avenir du secteur horticole en Europe: stratégies pour la croissance. *Rapport Commission de l'agriculture et Du Développement Rural (2013/2100(INI)*, 19.
- Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. (2010). *Stratégie nationale de développement durable*.
- Nozzi, V., Graber, A., Schmautz, Z., Mathis, A., & Junge, R. (2018). Nutrient Management in Aquaponics: Comparison of Three Approaches for Cultivating Lettuce, Mint and Mushroom Herb. *Agronomy*, 8, 15.
- Pantarella, E., Cardarelli, M., Colla, G., & Di Mattia, E. (2015). Aquaponics and food safety : effects of UV sterilization on total coliforms and lettuce productions. *Acta Hort.*, 1062, 71–76.
- Pantarella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2010). Aquaponics or hydroponics production and quality of lettuce crop. In *28 IHC Abstract* (p. 35).
- Perrot, L. (2017). *Etude de la faisabilité technico-économique d'un projet pilote en aquaponie*.
- Pillaert, E. (2014). *Bienvenue à la ferme et IPSOS dévoilent les résultats de leur étude : Les français et le consommateur local*. Info Presse.
- PNTTA. (1999). *Fiche Technique Tomate sous serre*.
- Policar, T. (2011). Diversification in Inland Finfish Aquaculture. In *Abstract Book: May 16-18, 2011, Pisek, Czech Republic. University of South Bohemia České Budějovice, Faculty of Fisheries and Protection of Waters*.
- Quémener, L., Suquet, M., Méro, D., & Gaignon, J. (2002). Selection method of new candidates for finfish aquaculture: the case of the French Atlantic, the Channel and the North Sea coasts. *Aquatic Living Resources*, 15, 293–302.
- Rackocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics- integrating fish and plant culture. *SRAC Publication - Southern Regional Aquaculture Center*, 454, 16.
- Rackocy, J., Shultz, R., Bailey, D., & Thoman, E. (2004). Aquaponic production of Tilapia and basil : comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Hort.*, 648(63–69).
- Rakocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics- integrating fish and plant culture. *SRAC Publication - Southern Regional Aquaculture Center*, 454, 16.
- Raulier, P., Stalport, B., Tomson, T., Massart, S., Stouvenakers, G., & Jijakli, M. (2018). Thématiques de recherche en aquaponie menées au centre de recherches en agriculture urbaine de Gembloux agro-biotec (Université de Liège).
- Rico Garcia, E., Casanova Villareal, V., & Mercado luna, A. (2009). Content of summer lettuce production using fish culture water. *Trands in Agriculture Economics*, 2, 1–9.
- Roque, E. (2008). *Optimisation de deux systèmes de production piscicole : biotransformation des nutriments et gestion des rejets*. Institut National polytechnique Toulouse.
- Rosenthal, H. (2011). *Cultivation of endangered species to achieve "fitness for survival" at release into natural habitats. W: Diversification in inland finfish aquaculture*. (Policar T.).
- Sardare, M., & Admane, S. (2013). A review on plant without soil-hydroponics. *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 2, 299–304.

- Savidov, N., & Rakocy, J. (2007). Fish and plant production in recirculating aquaponic system : a new approach of sustainable agriculture in Canada. *Acta Hort.*, 742, 209–221.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming* (No. 589).
- Timmons, M., & Ebeling, J. (2007). *Recirculating Aquaculture* (Cayuga Aqu).
- Tocqueville, A., Foucard, P., & Gaumé, M. (2016). *2ndes Journées d'échanges APIVA®. L'Aquaponie en France : au carrefour entre recherche/ développement et projets professionnels*.
- Tocqueville, A., Foucard, P., & Gaume, P. (2015). *1ères Journées d'échanges APIVA®. Premier colloque national sur l'Aquaponie. Colloque Du 1er et 2 Décembre 2015*.
- Trintignac, P., Le Bihan, V., & Lesage, C. (2016). *PETRA Etude technico-économique d'une production régionale de poissons en étangs pour le marché de l'alimentation humaine*.
- Van Woensel, L., & Archer, G. (2015). Dix technologies qui pourraient changer nos vies: impacts potentiels et conséquences des politiques. *Rapport Service de Recherche Du Parlement Européen, Unité de La Prospective Scientifique*, 38.
- Zakêœ, Z. (2012a). *Sander lucioperca: cultured aquatic species*. . FAO, Fisheries and Aquaculture Department, Rome.
- Zakêœ, Z. (2012b). The effect of body size and water temperature on the results of intensive rearing of pike-perch, *Stizostedion lucioperca* (L.) fry under controlled conditions. *Arch. Pol. Fish.*, 20, 165–172.



## Sitographie

Alim'agri (2013), Les auxiliaires de cultures, <http://agriculture.gouv.fr/quest-ce-quun-auxiliaire-de-culture>

APIVA : <https://projetapiva.wordpress.com/>

Aquaponie.biz, <http://www.aquaponie.biz/guide-de-culture-plantes-communes-aquaponie/>

Aquaculture magazine-Design Publication International : <https://www.linkedin.com/in/aquaculture-magazine-986a4297/>

Blog 3A Actualités aquacoles et aquaponiques du lycée Olivier Guichard de Guérande animé par Pierre GARSI : <http://www.scoop.it/t/actualites-aquacoles>

Food and Agriculture COST Action FA1305 Aquaponie : [http://www.cost.eu/COST\\_Actions/fa/FA1305](http://www.cost.eu/COST_Actions/fa/FA1305)

INAPRO : <http://www.inapro-project.eu/>

## Glossaire

**AFSSA** : Agence Française pour la Sécurité Sanitaire des Aliments

**APIVA** : AquaPonie, Innovation Végétale et Aquaculture

**AREXHOR** : Agence Régionale pour l'EXpérimentation HORTicole Pays de La Loire

**ASTREDHOR** : Association nationale des Structures d'Expérimentation et de Démonstration en HORTiculture.

**CA** : Chiffre d'Affaires

**CASDAR** : Compte d'Affectation Spécialisé du Développement Agricole et Rural

**CTIFL** : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

**DDPP** : Direction Départementale de la Protection des Populations

**DDT** : Direction Départementale des Territoires

**DPMA** : Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture

**DTPA** : Diéthylène Triamine Penta Acétique (chélateur)

**EDAP** : Expérimentation et Démonstration Aquaponique à vocation Pédagogique

**ETP** : Equivalent Temps Plein

**FEADER** : Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural

**FEAMP** : Fond Européen pour les Affaires maritimes et la pêche

**IC** : Indice de Conversion alimentaire

**IEMN-IAE** : Institut d'Economie et de Management de Nantes

**INAPRO**: "Innovative model & demonstration based water management for resource efficiency in integrated multitrophic agriculture and aquaculture systems" <http://www.inaproproject.eu/>

**ITAVI** : Institut Technique de l'Aviculture

**MCO** : Moindres Carrés Ordinaires (Méthode économique)

**MES** : Matières En Suspension

**OPRA** : Optimisation d'un Pilote Régionale d'Aquaponie

**RAS** : Recirculating Aquaculture System (en anglais) – Système en circuit recirculé

**SMIDAP** : Syndicat Mixte de Développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Pays de la Loire

**SAU** : Surface Agricole Utile

**TAN** : Total Ammonia Nitrogen

**URAFPA** : Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux



# Figures

Figure 1 : principe de l'aquaponie (Tocqueville A. <i>et al.</i> , 2016).....	11
Figure 2 : conception classique d'un système RAS, les filtres à UV et surpresseurs sont fonction du degré de qualité d'eau souhaité (D'après Bregnballe, 2010).....	12
Figure 3 : intensité de recirculation des systèmes d'élevage piscicole (Gaumé M. <i>in</i> Tocqueville <i>et al.</i> , 2016) .....	13
Figure 4 : schéma de principe d'une culture hydroponique (Somerville <i>et al.</i> , 2014).....	14
Figure 5 : Diagramme représentant la biodisponibilité des nutriments pour les racines en culture hydroponique selon le pH de la solution nutritive (Jones, 2005).....	15
Figure 6 : cycle de l'azote tel qu'il a lieu en aquaponie. Les populations bactériennes Nitrosomonas et Nitrobacter sont fonction de l'oxygène dissous et des valeurs de pH de l'eau (d'après Laguerre, 2013). .....	16
Figure 7 : les différentes approches économiques de l'aquaponie et leurs voies de valorisation (Benoit, 2016) .....	18
Figure 8 : calendrier du projet OPRA2 (d'après Benoit, 2016) .....	21
Figure 9 : objectifs d'OPRA2 .....	22
Figure 10 : photo de l'entrée principale du pilote OPRA (Smidap).....	22
Figure 11 : schéma de principe de l'installation guérandaise avant optimisation (Laviale, 2015) .....	23
Figure 12 : photo du compartiment filtration (Laviale, 2015).....	23
Figure 13 : photo des 2 bassins d'élevage ( smidap).....	24
Figure 14 : photos de 4 supports hydroponiques testés, le raft, le pain de coco, la bille d'argile et le NFT (smidap). .....	25
Figure 15 : photo de jardinières avec perlites (smidap) .....	26
Figure 16 : colonnes « ZipGrow » testées pour OPRA 2 (smidap) .....	26
Figure 17 : principales espèces élevées ou cultivées en aquaponie (Baroiller JF, <i>In</i> Tocqueville <i>et al.</i> , 2015).....	28
Figure 18 : méthode de détermination des surfaces de supports végétaux dans la serre projet (Perrot, 2017).....	33
Figure 19 : schématisation de la méthode de dimensionnement de la serre projet (Perrot, 2017).....	34
Figure 20 : photo du filtre tambour (smidap).....	35
Figure 21 : Le système RFS connecté au filtre à tambour (smidap) .....	35
Figure 22 : schéma du pilote aquaponique OPRA2 optimisé (d'après Benoit, 2016 et Perrot, 2017) .....	36
Figure 23 : aménagements isolation (smidap).....	36
Figure 24 : les diverses stratégies des plantes de services en Protection Biologique Intégrée (A. Ferre, com. pers.) .....	38
Figure 25 : plantes de service dans la serre (Perrot, 2017).....	38
Figure 26 : photo de chrysope (www.servomendi.com).....	38
Figure 27 : calendrier OPRA 2 .....	40
Figure 28 : évolution des températures et du pH de l'eau du pilote hivernal 2016-2017 (Perrot, 2017).....	42
Figure 29 : courbe de croissance TAC 3n Hiver 16-17 (Perrot, 2017).....	44
Figure 30 : truite de plus de 900 g (Garsi P.).....	44
Figure 31 : courbe de croissance d'après les résultats zootechniques des TAC 2n hiver 15-16 (Perrot, 2017).....	45

Figure 32 : truite d'un peu plus de 300 g vendue le 11/03/2016 (Garsi P.) .....	45
Figure 33 : courbe de croissance des sandres pendant le cycle estival 2016 (Perrot, 2017) .....	47
Figure 34 : photo des alevins de sandres introduit dans le pilote (smidap) .....	48
Figure 35 : mesures de paramètres de croissance des jeunes sandres par des élèves (smidap) .....	48
Figure 36 : courbe de croissance du sandre aquaponie été 2017 (Perrot, 2017) .....	49
Figure 37 : photo d'un sandre de 300g (smidap) .....	49
Figure 38 : photo d'un sandre de 600 g en novembre 2017 venant de la serre aquaponique (smidap) .....	50
Figure 39 : photo de cultures de poireaux, choux et radis en février 2017 .....	56
Figure 40 : photos de cultures de blettes, de cresson, de radis, de choux et de poireaux (smidap) .....	57
Figure 41 : rendements totaux/ plants sur NFT (à gauche) sur Pain de Coco (à droite)(Benoit, 2016).....	58
Figure 42 : rendements totaux par plant obtenus sur 2 supports (Benoit, 2016) .....	59
Figure 43 : photo de fraise Mara sur NFT (smidap) .....	59
Figure 44 : rendement hebdomadaire par plan en fonction de différentes variétés de tomates (Benoit, 2016).....	59
Figure 45 : Exemple d'une récolte pour un panier avec différentes variétés de tomates (smidap).....	60
Figure 46 : photo de différentes variétés de basilic sur RAFT (smidap) .....	61
Figure 47 : dégâts causés par les thrips sur les fraises (Perrot L.) .....	62
Figure 48 : photo des tomates grappes début juillet 2017 (smidap) .....	63
Figure 49: schéma d'agencement d'une serre d'aquaponie de 265.2 m <sup>2</sup> (Perrot, 2017).....	69
Figure 50 : répartition des charges variables selon les scenarios .....	74
Figure 51 : répartition du chiffre d'affaires végétal et poisson selon les scenarios .....	74
Figure 52 : récapitulatif des choix d'espèces pour le dimensionnement de la serre projet.....	75
Figure 52 : schémas de différents systèmes aquaponiques découplés (source : <i>aquaculture magazine</i> ).....	78
Figure 53 : schéma de principe de la mise en place d'un système mécanique de traitement des boues piscicoles (Perrot, 2017) et Foucard, com. Pers., juin 2017 .....	80
Figure 54 : schéma de principe d'un système de traitement de lombricompostage (Perrot, 2017) .....	81

## Tableaux

Tableau 1 : avantages et inconvénients de l'aquaculture en circuit fermé par rapport à l'aquaculture en circuit ouvert (Benoit, 2016) .....	13
Tableau 2 : avantages et inconvénients des cultures hydroponiques par rapport à une culture sur terre (Benoit, 2016) .....	14
Tableau 3 : production légumière en tonnage et en surface en Pays de la Loire et en France (Agreste, 2015) .....	19
Tableau 4 : matrice SWOT pour un bilan du procédé et de la filière d'aquaponie (Benoit, 2016 d'après Foucard <i>et al.</i> , 2015) .....	20
Tableau 5 : critères de classement technico-économique des espèces candidates en aquaponie .....	27
Tableau 6 : paramètres de qualité de l'eau analysés .....	29
Tableau 7 : classement technico-économique des espèces candidates pour la conduite du pilote OPRA (contexte régional) .....	40
Tableau 8 : paramètres observés dans des systèmes RAS selon les espèces (d'après Dalsgaard <i>et al.</i> , 2013) .....	40
Tableau 9 : températures et pH de l'eau lors des cycles hivernaux 2015-2016 et 2016-2017 .....	42
Tableau 10 : moyenne des résultats des analyses d'eau du cycle hiver 2016-2017 .....	43
Tableau 11 : résultats zootechniques de l'élevage des TAC en aquaponie durant le cycle hiver 2016-2017 .....	44
Tableau 12 : températures et pH de l'eau lors des cycles estivaux 2016 et 2017 .....	46
Tableau 13 : moyennes des résultats des analyses d'eau cycle été 2017 (cuve de reprise) .....	47
Tableau 14 : itinéraire technique du sandre en aquaponie selon nos résultats réels et théoriques .....	49
Tableau 15 : espèces végétales cultivées et leurs supports pendant le cycle hiver OPRA2 (Perrot, 2017) .....	51
Tableau 16 : espèces végétales cultivées et leurs supports pendant le cycle été 2017 OPRA2 (Perrot, 2017) .....	52
Tableau 17 : planning de production d'après les végétaux choisis dans le scénario économique (Perrot, 2017) .....	53
Tableau 18 : moyennes des analyses d'eau du cycle été 2016 (juin-octobre) .....	54
Tableau 19 : moyennes des analyses d'eau du cycle hiver 2016/2017 (novembre-mai) .....	54
Tableau 20 : moyennes des analyses d'eau du cycle été 2017 (juin-août) .....	55
Tableau 21 : données théoriques paramètres de l'eau .....	55
Tableau 22 : valeurs microbiologiques de référence pour les légumes fruits et valeurs mesurées sur des salades du pilote OPRA .....	56
Tableau 23 : données de performances végétales du cycle hiver 2016-2017 .....	57
Tableau 24 : variétés de fraises produites .....	58
Tableau 25 : variétés de tomates produites .....	59
Tableau 26 : résultats de production d'herbes aromatiques durant le cycle estival 2016 .....	60
Tableau 27 : résultats phyto-techniques des aromates du cycle été 2017 (Perrot, 2017) .....	61
Tableau 28 : données phyto-techniques des deux variétés de fraises cycle été 2017 .....	62
Tableau 29 : performances zootechniques Tomate Grappe et Cerise cycle été 2017 .....	63
Tableau 30 : choix des variétés végétales et des supports selon le cycle estival et le cycle hivernal .....	64
Tableau 32 : premier essai de dimensionnement d'une serre de 202.8 m <sup>2</sup> (Hinckel & Louis-Sydney, 2017) .....	65

Tableau 33 : prix de vente (€/kg) par espèce retenue dans le projet (V. Le Bihan, d'après données FranceAgriMer) .....	66
Tableau 34 : proportion du CA/support/m <sup>2</sup> en hiver et en été (Perrot, 2017) .....	66
Tableau 35 : surfaces définies pour chaque support par rapport aux ratios du CA été (Perrot, 2017).....	67
Tableau 36 : données zootechniques sandres et truites pour la serre projet avec méthode du RTA appliquée sur la densité finale. .....	68
Tableau 37 : dimensionnement des unités de production de la serre d'aquaponie OPRA2 2017 .....	68
Tableau 38 : principaux postes de charges fixes.....	70
Tableau 39 : charges variables partie piscicole .....	71
Tableau 40 : charges variables eau et électricité .....	72
Tableau 41 : temps de travaux par mois et selon les compartiments de la serre projet d'après les données du pilote .....	73
Tableau 42 : charges variables temps de travail .....	73
Tableau 43 : Répartition du chiffre d'affaires annuel sur les 2 cycles .....	74
Tableau 44 : résultat courant avant impôts de l'activité (€ HT) (Activités piscicoles et végétales confondues) .....	75

# Annexes



## ROUTINE QUOTIDIENNE SERRE

### • Compartiment poisson

- Mesure pH
- Mesure O2
- Mesure de la consommation d'eau
- Siphonage des bassins
- Purges (1 jour sur 2) bassins
- Purges décanteur ( 1 jour sur 2 )
- Nettoyage des distributeurs à nourriture
- Donner les rations dans les distributeurs et une petite partie à la main pour observation

### • Compartiment végétal

- Changer les distributeurs d'eau de position sur les pains de coco
- Vérifier les débits sur l'ensemble des supports
- Effectuer les récoltes nécessaires
- Enlever les gourmands sur les plants de tomates
- Enlever les éléments morts
- Arroser les plantes de service

## ROUTINE HEBDOMADAIRE SERRE

- Vérifier l'électro conductivité
- Nettoyer le filtre de récupération avec épuisette
- Analyses d'eau ( 1 semaine sur 2)

## ROUTINE MENSUELLE SERRE

- Nettoyer les colonnes sur les différents supports
- Poids moyen



## Annexe 2 : valeurs de qualité de l'eau à ciblées en aquaponie (Via Foucard et al., 2015)

Paramètre	Compromis en aquaponie
Température	[15-25°C]
pH	[6,5-7,5]
O <sub>2</sub> dissous	> 5 mg/L
Taux de saturation O <sub>2</sub>	Proche de 100%
CO <sub>2</sub> dissous	<20 mg/L
MES	<30 mg/L
TAN (à T 15°C ; pH 7)	<3,7 mg/L
Ammoniac N-NH <sub>3</sub>	<0,01 mg/L
Ammoniaque N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	< 1,5 mg/L
Nitrites N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<0,3 mg/L
Nitrates N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<250 mg/L
Conductivité	[0,3-0,8] mS/cm
Alcalinité	>150 mg/L CaCO <sub>3</sub>
Dureté de l'eau	[6-20] °f
Potentiel redox	[+ 200 à +400 ] mV
Fer soluble (II)	<1 mg/L



## Annexe 3 :différents supports de culture hydroponiques (Benoit, 2016)

Fiches techniques élaborées en vue de travaux pratiques avec des élèves de Bac Pro Aquaculture.

Quatre fiches de TP à partir des lectures bibliographiques, notamment la synthèse APIVA. Elles ont constitué un support de travail pour les élèves de Bac Pro Aquaculture du Lycée Olivier Guichard de Guérande lors des Travaux Pratiques effectués dans la serre d'aquaponie. Elles reprennent les caractéristiques des différents supports végétaux utilisés en aquaponie et testés au sein du pilote OPRA.

Source : Foucard P., Tocqueville A. Gaumé M., Labbé L. Lejolivet C., Baroiller J.F, Lepage S., Darfeuille B. (2015) – L'aquaponie, une association vertueuse des poissons et des végétaux en eau douce : synthèse technique, économique et réglementaire. Projet APIVA (AquaPonie, Innovation Végétale et Aquaculture).

### **Illustrations des supports de culture**

Culture sur RAFT



Culture sur substrat inerte (Pains de coco)



Culture sur substrat inerte (Billes d'argile)



Culture sur NFT





# Cultures sur Raft ou DWC

Culture sur Rafts (radeaux) ou Culture en eau profonde (DWC - Deep Water Culture)

## Qu'est-ce que c'est ?

Les plantes sont posées sur un « radeau » flottant, percé, les racines trempant directement dans l'eau « enrichie ». Le lit de culture est constitué d'un bassin d'une trentaine de centimètres de profondeur, sur lequel flottent les radeaux servant de support aux plantes.

Compte tenu de sa facilité de manipulation c'est la **technique la plus utilisée en aquaponie** dans un but commercial, car elle permet aussi une rotation de culture sans risquer d'abîmer les racines.

Cette technique fonctionne **en flux continu**. Les racines des plants sont en permanence dans la solution nutritive qui se doit d'être bien oxygénée afin de permettre le captage des nutriments.

Les avantages	Les inconvénients
<i>Le système le plus simple !</i>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- Nettoyage facilité</li><li>- Pas de coût d'achat du substrat</li><li>- Manipulation facile des plantes</li><li>- Les racines sont bien oxygénées</li><li>- Facilité de la vérification de l'état sanitaire des racines et des plantes</li><li>- Plants faciles à extraire</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Besoin d'un apport d'air</li><li>- Matériel des radeaux neutre, pour l'alimentaire : important pour éviter des intrants néfastes</li><li>- Bilan carbone des plaques en polystyrène</li><li>- Faible pouvoir de stock de bactéries</li><li>- Nécessité d'une filtration amont efficace</li></ul>



Contrairement à certaines idées reçues, le réservoir de solution nutritive présent sous les radeaux ne peut pas constituer le bassin d'élevage des poissons. En effet, ceux-ci rejettent de l'ammoniaque  $\text{NH}_4^+$ . Cette forme de l'azote est toxique pour les plantes et les poissons. L'eau doit donc être traitée en sortie d'élevage avant d'être intégrée au système hydroponique. L'eau passe donc par une filtration mécanique et biologique. Les surfaces des radeaux et des réservoirs peuvent héberger des bactéries mais ne sont pas suffisamment importantes pour permettre une nitrification complète du pool d'ammoniaque.



# Cultures sur Substrat Inerte

## Goutte à goutte sur Pain de Coco

### Qu'est-ce que c'est ?

Souvent utilisée, cette technique permet la culture d'une large gamme de végétaux (notamment des tomates, concombres, fraises). Il suffit de mettre en place une table pour poser les substrats puis de les irriguer à l'aide d'un goutte à goutte d'irrigation.

Ce substrat complète l'action dénitrifiante des filtres biologiques sous l'action de bactéries hétérotrophes qui colonisent le système.

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>- Facilité de mise en place</li><li>- Grande surface possible : plantes volumineuses</li><li>- Fort pouvoir de stock bactérien</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Risque d'accumulation de certains éléments nutritifs</li><li>- Colmatage du système</li><li>- Poids</li><li>- Risque de bioagresseurs</li></ul>



Le pain de coco constitue un substrat neutre, inerte qui peut être réutilisé plusieurs années.



# Cultures sur Substrat Inerte

## Irrigation sur Billes d'Argile

### Qu'est-ce que c'est ?

Cette technique est le plus souvent utilisée dans le cadre d'une aquaponie de loisir, à petite échelle, et où la maximisation de la production n'est pas un objectif. Elle permet la culture d'une large gamme de végétaux (notamment des tomates, concombres, fraises) et nécessite simplement un conteneur rempli d'un substrat neutre et inerte de type gravier/ billes d'argiles etc.

Ces médias sont irrigués en continu ou en discontinu, c'est-à-dire soit avec un débit circulant continu de l'eau comme en raft ou NFT, ou par des inondations et drainages successifs du support de culture aussi appelé «ebb & flow», technique pour laquelle un siphon automatique est utilisé pour le drainage de l'eau. *(Non illustré ici)*

Ce substrat complète l'action dénitrifiante des filtres biologiques sous l'action de bactéries hétérotrophes qui colonisent le système.

Les avantages	Les inconvénients
<i>Le préféré des aquaponistes en herbe !</i>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- Facilité de mise en place</li><li>- Grande surface possible : plantes volumineuses</li><li>- Fort pouvoir de stock bactérien</li><li>- Economie d'eau par rapport au DWC</li><li>- Possibilité de plantes tubercules !</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Risque d'accumulation de certains éléments nutritifs</li><li>- Colmatage du système</li><li>- Poids du système</li><li>- Nettoyage annuel</li></ul>



Contrairement aux autres systèmes, celui-ci permet de se passer du filtre biologique. En effet, les bactéries se développent au sein du substrat sur lequel elles exercent les actions de dénitrification. On peut ainsi simplement poser son bac de substrat au-dessus du bac des poissons pour faire un cycle ultra court et gagner de la place.



# Cultures sur NFT

Technique de culture sur film nutritif (NFT: Nutrient Film Technique)

## Qu'est-ce que c'est ?

Dans les systèmes de culture hors sol de type NFT, l'eau riche en nutriments est pompée dans de petites rigoles fermées.

L'eau s'écoule en flux permanent dans le système, d'abord à travers des composants de filtration, puis sur des gouttières très légèrement inclinées sur lesquelles les plantes (en pots, dans du substrat inerte) captent les nutriments indispensables à leur croissance, avant de retourner dans le compartiment aquacole. Le **film d'eau très fin** s'écoule ainsi vers le bas de chaque canal des gouttières, inclinées d'une pente d'environ 1%. Un débit de 1 à 2 L/min est recommandé. L'oxygénation de la solution nutritive s'effectue en grande partie par son déplacement dans les gouttières et par la **grande surface d'échange entre l'eau et l'air**.

Les avantages <i>Optimal pour l'agriculture urbaine !</i>	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>- Structure verticale : gain d'espace</li><li>- Léger</li><li>- Aspect / design intéressant</li><li>- Oxygénation simplifiée</li><li>- Utilisation d'espace disponible sur des parois</li><li>- Une diversité de plants indépendants</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Filtration en amont importante</li><li>- Productivité restreinte au nombre de trous disponible</li><li>- Régulation du débit à maîtriser</li></ul>



Les NFT sont utilisés dans la conception de murs végétaux qui utilisent les principes de l'Hydroponie. De nombreuses villes s'en sont équipées pour « végétaliser » l'environnement urbain, telles que Paris, Nantes ou Bordeaux... Attrayantes, ces structures sont à la fois design et peuvent produire des légumes avec une consommation en eau plus restreinte que les autres systèmes.

Source : Foucard P., Tocqueville A. Gaumé M., Labbé L. Lejolive C., Baroiller J.F., Lepage S., Darfeuille B. (2015) – L'aquaponie, une association vertueuse des poissons et des végétaux en eau douce : synthèse technique, économique et réglementaire. Projet APIVA (AquaPonie, Innovation Végétale et Aquaculture).

Auteur : Julie BENOIT – Stagiaire projet OPRA2 - SMIDAP



# Annexe 4 : résultats d'analyses d'eau avec le laboratoire Inovalys

**inovalys**

**Inovalys Nantes**  
Route de Gachet - BP 52703 - 44327 NANTES CEDEX 03  
Tél : 02.51.85.44.44 - Fax : 02.51.85.44.50 - www.inovalys.fr



RAPPORT D'ANALYSE N° : **D170302182**

LYCEE PROFESSIONNEL OLIVIER GUICHARD  
A l'attention de Pierre Garsi  
12 rue de la Fauvette

Réf. Dossier : DEVIS 0877 ES 2017

44350 GUERANDE

Fax. 02 40 89 61 47

Objet : Eau d'irrigation - Guérande

**ECHANTILLON N° : E170306310** (Eau brute destinée alimentation humaine)

Descriptif : Eau d'irrigation

Prélevé le : 21/03/2017 08:30

Date début analyse échantillon : 22/03/2017

Par : CLIENT

Analyses	Résultats	Spécifications	Références méthodes Types Méthodes	LQ	Déb. analyse
* Cuivre n° CAS: 7440-50-8 n° Sandre : 1392	4 µg/L		NF EN ISO 17294-2 (T90-164) ICP-MS	1	27/03/2017
* Fer n° CAS: 7439-89-6 n° Sandre : 1393	0,20 mg/L		Méthode interne N-EAUX/M/053 Flux continu	0,02	
* Manganèse n° CAS: 7439-96-5 n° Sandre : 1394	< 1 µg/L		NF EN ISO 17294-2 (T90-164) ICP-MS	1	27/03/2017
* Zinc n° CAS: 7440-66-6 n° Sandre : 1383	36 µg/L	<= 5000	NF EN ISO 17294-2 (T90-164) ICP-MS	4	27/03/2017
* Bore n° CAS: 7440-42-8 n° Sandre : 1362	37 µg/L		NF EN ISO 17294-2 (T90-164) ICP-MS	5	24/03/2017
* Zinc n° CAS: 7440-66-6 n° Sandre : 1383	36 µg/L	<= 5000	NF EN ISO 17294-2 (T90-164) ICP-MS	2	24/03/2017

Approuvé le 31/03/2017 par Aurelien FERCHAUD , Responsable adjoint Labo. Chimie Environnement



# Annexe 5 : résultats d'analyses de salades avec le laboratoire Inovalys



NANTES  
Route de Gachet - BP 52703 - 44327 Nantes Cedex 3  
Tél. 02 51 85 44 44 - Fax 02 51 85 44 50 - www.inovalys.fr



RESULTATS DU DOSSIER : **D160703593**

(Ce document n'est pas le rapport d'analyse définitif)

Réf. Dossier : DEV 2029 AA 2016

LYCEE PROFESSIONNEL O. GUICHARD

A l'attention de Pascal TRINTIGNAC  
12 rue de la Fauvette

44350 GUERANDE

Fax. 02 40 89 61 47

Objet : ANALYSE BACTERIOLOGIQUE SUR SALADES

Dossier enregistré le : 29/07/2016 Edité le : 23/08/2016

ECHANTILLON N° : E160709090 (Légumes)

Descriptif : SALADE

Date début analyse échantillon : 29/07/2016

Analyses	Résultats	Références méthodes Types Méthodes	LQ Dth. analyse
Température à l'arrivée au laboratoire :	Conforme ISO 7218		29/07/2016
* Microorganismes aérobies à 30°C	970000 /g	NF EN ISO 4833-1	1000 29/07/2016
* Escherichia coli Béta glucuronidase + à 44°C	< 10 /g	NF EN ISO 16649-2	10 29/07/2016
* Staphylocoques à coagulase + à 37°C	< 10 /g	NF EN ISO 6888-2/A1	10 29/07/2016
* Salmonella spp Recherche	Absence /25g	IRIS - BKR 23/07 - 10/11	29/07/2016
Nitrites n° Sandre : 1339	< 1 mg/kg	NF EN 12014-7 Flux continu	1 09/08/2016
Nitrates n° Sandre : 1340	3000,0 mg/kg	NF EN 12014-7 Flux continu	1 09/08/2016

Approuvé le 10/08/2016 par Bernard CARON , Chargé d'études Agro-Alimentaire

Les échantillons ont été validés pour une commercialisation destinée à la consommation humaine, selon les normes :

- Règlement (CE) n°852/2004
- Règlement (CE) n°2073/2005
- Saisine Afssa – n°2007-SA-0174
- Règlement (CE) n°1881/2006



## Annexe 6 : table de rationnement aliment TAC

### ROYAL STAR

**SEMI-FLOATING FEED TO ACHIEVE THE BEST COMPROMISE BETWEEN GROWTH,  
FINANCIAL VALUE AND GUTTED WEIGHT**

Particle size	3,0 mm	4,5 mm	6.0 mm
Protein	46 %	46 %	46 %
Fat	20 %	22 %	22 %
Ash	8,6 %	9 %	9 %
Crude fibre	0,8 %	0,6 %	0,8 %
Total P	1,3 %	1,3 %	1,3 %
<b>Vitamins added</b>			
Vitamin A	18.780 UI/kg	21000 UI/kg	21000 UI/kg
Vitamin D3	40 UI/kg	-	-
Vitamin E	200 mg/kg	180 mg/kg	180 mg/kg
Vitamin C (stable)	330 mg/kg	315 mg/kg	315 mg/kg
Digestible Energy	20,0 MJ/kg	20,4 MJ/kg	20,4 MJ/kg

#### Technical Information

The high level of protein means that this feed combines growth with excellent tasting flesh while keeping the trout lean and aggressive for fishing and restocking (ease of transport).

Highly effective for intensive farming, its composition rich in animal proteins and low in or even free from soya makes it very cost-effective, without affecting the flesh quality and gutted weight.

**Feeding table:** The feeding table is intended as a guideline, to be adapted according to farming conditions.

Fish weight (gr)		15 - 25	25 - 70	70 - 135	135 - 200	200 - 400	400 - 700	700 - 1000
Daily rations in % of live weight, according to water temperature.	4 °C	0,55	0,50	0,45	0,4	0,35	0,25	0,25
	6 °C	0,75	0,70	0,65	0,55	0,5	0,40	0,40
	8 °C	1,15	1,05	0,9	0,8	0,7	0,65	0,60
	10 °C	1,50	1,35	1,05	0,95	0,8	0,90	0,80
	12 °C	1,60	1,45	1,1	1	0,85	0,95	0,85
	14 °C	1,60	1,45	1,1	1,1	0,90	0,95	0,85
	16 °C	1,50	1,35	1,15	1,05	0,95	0,90	0,78
	18 °C	1,25	1,10	0,95	0,8	0,65	0,65	0,60
20 °C	0,80	0,70	0,6	0,5	0,4	0,40	0,40	



## Annexe 7 : table de rationnement aliment sandre



### SUPREME-10



- Haute qualité régime faible en gras
- Optimisation de la vitesse de croissance
- Contient du FOR<sup>PLUS</sup>™ (algue riche en omega-3)
- Adapté aux perches et Silures Européens

### COMPOSITION:

Analyse (%)		Taille:
Protéines	49%	3.0 mm
Lipides	10%	4.5 mm
Fibres	0,9%	6.0 mm
Cendres	8,3%	8.0 mm
Total P	1,32%	10.0 mm

Vitamines supplémentaires	
Vitamine A (IE/kg)	10.000
Vitamine D (IE/kg)	1.090
Vitamine E (mg/kg)	200
Vitamine C (stable) (mg/kg)	250

Energie	
Brute (MJ/kg)	22,3
Digestible (MJ/kg)	20,5

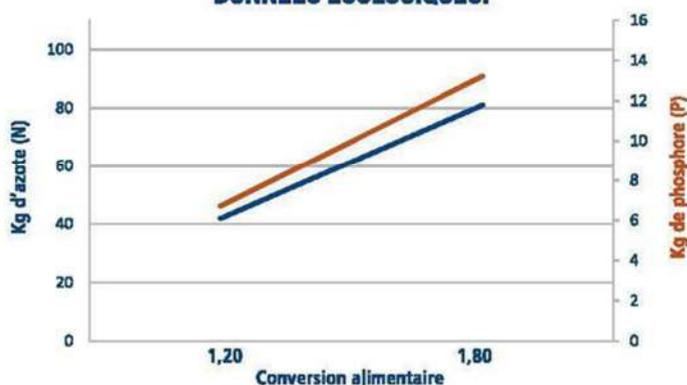
Les valeurs des nutriments et des vitamines sont celles relevées au moment de la rédaction de ce document. Elles peuvent varier, en raison des variations naturelles des ingrédients. Nous nous réservons le droit de modifier nos formulations sans préavis. Pour les valeurs exactes, consultez l'étiquette.

### TABLE DE NOURRISSAGE POUR OPTIMISATION DE LA CROISSANCE:

Poids du poisson (g)	Taille granulé (mm)	< 12 °C	12 °C	14 °C	16 °C	18 °C	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C	28 °C	> 28 °C
50-100	3.0		0,42	0,52	0,73	1,05	1,57	1,78	1,99	2,20	1,78	
100-200	3.0		0,29	0,37	0,58	0,94	1,15	1,36	1,47	1,89	1,36	
200-300	4.5	Selon l'appétit du poisson	0,25	0,31	0,52	0,68	0,84	0,94	1,15	1,26	1,15	
300-500	4.5		0,21	0,26	0,47	0,58	0,73	0,84	0,94	1,15	1,05	
> 500	6.0		0,17	0,21	0,42	0,52	0,63	0,73	0,94	0,94	0,73	

\* Ce nourrissage conseillé est exprimé en % de la biomasse par jour.  
\* Il ne s'agit que d'un guide indicatif et doit être utilisé comme tel.

### DONNÉES ÉCOLOGIQUES:





## Annexe 8 : paramètres Zootechniques élevage de Truites TAC 3n hiver 2016-2017

	<i>Période totale</i>	<i>Période 1</i>	<i>Période 2</i>	<i>Période 3</i>
Effectif initial	80	80	78	77
Poids moyen initial (g)	302	302	450	761
Biomasse initiale (kg)	24,2	24,2	35,1	58,6
Densité initiale (kg/m <sup>3</sup> )	4,8	4,8	7,02	11,7
Effectif final	73	78	77	73
Poids moyen final (g)	898	450	761	897,5
Biomasse finale (kg)	65,6	35	58,6	65,5
Densité finale (kg/m <sup>3</sup> )	13,1	7,02	11,7	13,1
Taux de survie (%)	91	97,5	98,7	95
Date de mise en élevage	25/11/2016	25/11/2016	02/02/2017	27/03/2017
Date de fin d'élevage	18/05/2016	02/02/2017	27/03/2017	18/05/2017
Durée d'élevage (j)	174	70	53	52
Taux de renouvel.( m <sup>3</sup> /kg aliment)	0,4			
Gain de poids global (kg)	41,4	10,9	23,5	6,9
Taux de croissance (%/ jour)	0,6	0,6	1,0	0,3
Type d'aliment (mm)	Royal Star (4,5-6)	Royal Star (4,5-6)	Royal Star (4,5-6)	Royal Star (4,5-6)
Qté d'aliment distribuée (kg)	50,8	12,06	21,42	21,42
IC moyen	1,2	1,1	0,9	3,1
Taux de protéines	46%	46%	46%	46%
Energie (MJ/kg)	20,4	20,4	20,4	20,4
Ration alimentaire/ jour en moyenne (g)	292	172,29	404,15	411,9

## Annexe 9 : résultats théoriques zootechniques élevage TAC en circuit recirculé

### Données zootechniques Truites

<b>Théorique</b>			
Phase d'élevage	Durée d'élevage (j)	IC	% Mortalité
15- 300 (g)	180-190	0,8-1	7
70-300 (g)	100-110	0,9-1	4
100- 700 (g)	150-160	1-1,1	3
300-900 (g)	70-80	1,1-1,2	1

D'après courbe de croissance théorique TAC à 16°C

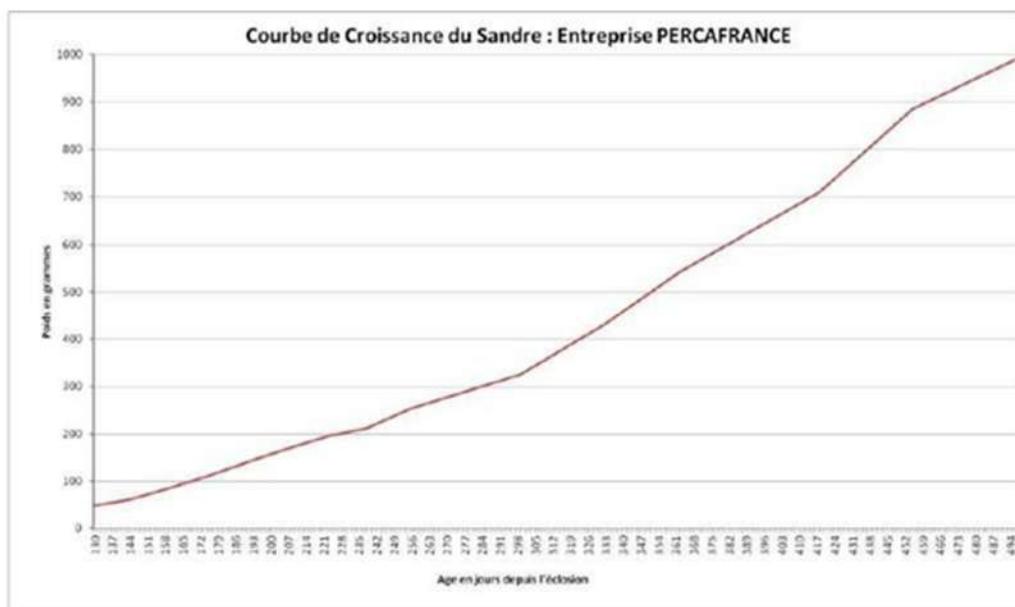
D'après Pierre Garsi, communication pers, , juillet 2017



## Annexe 10 : principaux paramètres d'élevage de sandres lors du cycle estival 2016

Paramètres	Données mesurées
Effectif initial	592
Poids moyen initial (g)	13,3
Biomasse initiale (kg)	7,9
Densité initiale (kg/m <sup>3</sup> )	3,15
Effectif final	552
Poids moyen final (g)	50,47
Biomasse finale (kg)	27,9
Densité finale (kg/m <sup>3</sup> )	11,144
Taux de survie (%)	93,2
Date de mise en élevage	14/06/2016
Date de fin d'élevage	25/11/2016
Durée d'élevage (j)	164
Taux de renouvel.( m <sup>3</sup> /kg	1
Gain de poids global (kg)	20,0
Taux de croissance (%/ jour)	0,81
Type d'aliment (mm)	Supreme 10
Qté d'aliment distribuée (kg)	23,415
IC moyen	1,17
Taux de protéines	49%
Energie digestible (MJ/kg)	20,5
Ration alimentaire/ jour en moyer	142,77

## Annexe 11 : courbe théorique de croissance sandre en circuit fermé recirculé à 22°C (Percafrance)





## Annexe 12 : paramètres Zootechniques élevage de Sandres été 2017

	Période réelle	Période totale (théorique inclus)
Effectif initial	131	131
Poids moyen initial (g)	285,5	285,5
Biomasse initiale (kg)	37,39	37,39
Densité initiale (kg/m <sup>3</sup> )	7,48	7,48
Effectif final	131	127
Poids moyen final (g)	397	650
Biomasse finale (kg)	52,007	82,55
Densité finale (kg/m <sup>3</sup> )	10,40	16,51
Taux de survie (%)	100%	95
Date de mise en élevage	02/06/2017	02/06/2017
Date de fin d'élevage	02/07/2017	01/10/2017
Durée d'élevage (j)	30	127
Taux de renouvellement (m <sup>3</sup> /kg)	0,4	0,4
Gain de poids global (kg)	14,61	45,16
Taux de croissance (%/ jour)	1,10	0,65
Type d'aliment (mm)	Supreme 10 (4,5)	Supreme 10 (4,5-6)
Qté d'aliment distribuée (kg)	5,84	
IC moyen	0,40	1,25
Taux de protéines	49%	49%
Energie digestible (MJ/kg)	20,5	20,5
Ration alimentaire/ jour en moyenne (g)	194,7	



## Annexe 13 : analyse statistique corrélation production végétale et température (Benoit, 2016)

### Analyse statistique Ciboulette

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Température	19	11,778	22,697	17,035	3,060
Rendement 2 supports	19	0,000	560,900	93,453	131,349

Matrice de corrélation (Spearman) :

Variables	Température	Rendement 2 supports
Température	<b>1</b>	<b>0,540</b>

Rendement 2 supports	<b>0,540</b>	<b>1</b>
----------------------	--------------	----------

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05*

p-values :

Variables	Température	Rendement 2 supports
Température	<b>0</b>	<b>0,018</b>
Rendement 2 supports	<b>0,018</b>	<b>0</b>

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05*

### Analyse statistique Basilic

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Température	12	16,789	22,697	19,260	1,712
Rendement Basilic	12	26,000	597,400	261,629	199,602

Matrice de corrélation (Spearman) :

Variables	Température	Rendement Basilic
Température	<b>1</b>	<b>0,893</b>
Rendement Basilic	<b>0,893</b>	<b>1</b>

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05*

p-values :

Variables	Température	Rendement Basilic
Température	<b>0</b>	<b>0,012</b>
Rendement Basilic	<b>0,012</b>	<b>0</b>

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05*



## Annexe 13 (suite)

### Analyse statistique Persil

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Température	20	11,778	22,697	17,209	3,078
Rendement persil	20	20,000	568,500	155,471	165,142

Matrice de corrélation (Spearman) :

Variables	Température	Rendement persil
Température	1	<b>0,946</b>
Rendement persil	<b>0,946</b>	1

Température	1	<b>0,946</b>
Rendement persil	<b>0,946</b>	1

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha=0,05$*

p-values :

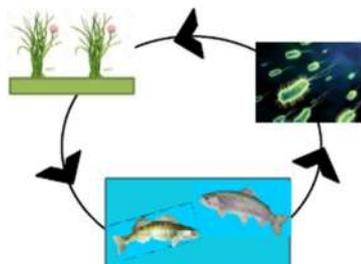
Variables	Température	Rendement persil
Température	0	<b>0,000</b>
Rendement persil	<b>&lt; 0,0001</b>	0

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha=0,05$*



Annexe 14 : exemples d'affiches de communication mise en place dans la serre pour la vente directe (Perrot, 2017)

**PRODUITS EN AQUAPONIE**

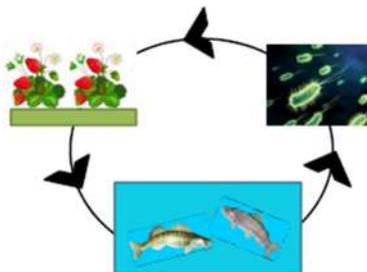


**CIBOULETTE**

La botte 50 cts

(Environ 100 grs)

**PRODUITS EN AQUAPONIE**



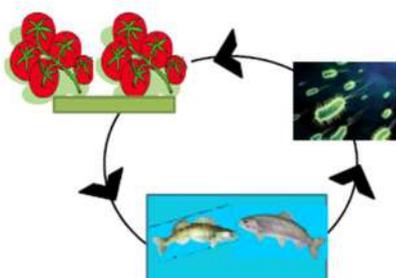
**FRAISES**

*MARA DES BOIS*

La barquette (250gr) 3 €



**PRODUITS EN AQUAPONIE**

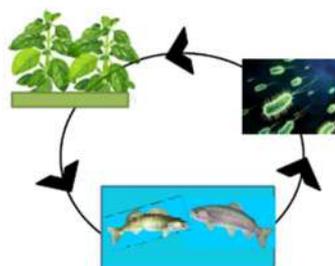


**TOMATES  
MATINA**

La barquette 2 €

(Environ 500 grammes)

**PRODUITS EN AQUAPONIE**



**BASILIC  
GRAND VERT**

La botte 50 cts

(150 grammes)





## Annexe 15 : données brutes de calcul de densités initiales et finales à partir de la méthode du RTA (Perrot, 2017)

Cycle d'élevage	SANDRES 10 à 50g	SANDRES 200 à 700 g	TRUITES 70 à 600 g	TRUITES 300à 900 g
<b><u>Données : à rentrer à la main</u></b>				
Surface végétale utile (m <sup>2</sup> )	127,0	127,0	127,0	127,0
Aliment / m <sup>2</sup> végétal / jour (g)	40	40	40	40
Poids moyen initial (g)	10	200	70	302
Température moyenne initiale (°C) <i>A fixer</i>	18	18	11	11
Taux de rationnement initial ( <i>Table de rationnement</i> )	1,4	0,7	1,4	0,83
Poids moyen final (g)	50,7	650	600	900
Température moyenne finale (°C) <i>A fixer</i>	16	16	17	16
Taux de rationnement final ( <i>Table de rationnement</i> )	0,9	0,5	0,9	0,78
Nombre de jours d'élevage	129	128	177	174
Taux de survie	0,94	0,95	0,97	0,91
<b><u>Calcul de la densité finale à partir du RTA :</u></b>				
Aliment total distribué / jour (g) (pour un RTA donné)	5078,49	5078,49	5078,49	5078,49
Biomasse finale (kg)	564,3	1015,7	564,3	651,1
Effectif final	11130	1563	940	723
Effectif final / bac	2225,9	312,5	188,1	144,7
Densité finale (kg/m <sup>3</sup> )	21,3	38,3	21,3	24,6
<b><u>Calcul de la densité initiale à partir de la densité finale :</u></b>				
Effectif initial	11840	1645	970	795
Effectif initial / bassin	2368	329	194	159
Biomasse initiale (kg)	118,4	329,0	67,9	240,1
Densité finale (kg/m <sup>3</sup> )	4,5	12,4	2,6	9,1
Gain de poids (kg)	445,9	686,7	496,4	411,0
<b><u>Calcul des performances zootechniques ( à partir du RTA)</u></b>				
Aliment total distribué (kg)	655,13	650,05	898,89	883,66
IC calculé	1,5	0,9	1,8	2,1
<b><u>Calcul à partir d'un IC théorique :</u></b>				
IC théorique	1,2	1,3	1	1,2
Aliment total distribué à partir de l'IC théorique	535	893	496	493



## Annexe 16 : montant des charges variables et charges fixes serre dimensionnée

### **CHARGES VARIABLES (€ HT)**

CV VEGETAL (€ HT)		2327,1
CV ANIMAL (€ HT)	Scénario A	13459,3
	Scénario B	11286,2
	Scénario C	13897,1
	Scénario D	11724

CV ELECTRICITE (€ HT) 2532,9

CV EAU (€ HT) 2900,31

Charges variables travail (€ HT)	Smic (€ / mois)	1628,3
	Charges patronales (€ / mois)	105,3
	TOTAL	10401,5

**CHARGES FIXES (€ HT)** 11324,9



## Annexe 17 : équipements utiles à l'installation d'un système mécanique de traitement des boues

Equipement	Prix unitaire (€ HT)	Quantité	Prix total (€ HT)
Bac collecteur / mélangeur <a href="http://www.cofa.fr/fr/produit/bac-collecteur-sortie-o-200-mm/">http://www.cofa.fr/fr/produit/bac-collecteur-sortie-o-200-mm/</a>	800	1	800
Sac géo tubes 1 m3	30	5	150
Floculant bidon 10L (50mL floculant pour 80 L boues) (Foucard, comm pers, Juin 2017)	50	1	50
Vannes, coudes, tubes (forfait)	20	1	20
Pompe (Peima, 2012)	257	1	257
<b>TOTAL</b>			<b>1 277€ HT</b>

## Annexe 18 : achats nécessaires à la mise en place d'un système de lombricompostage

Equipement	Prix unitaire (€ HT)	Quantité	Prix total (€ HT)
Bac lombricomposteur 1 m3 <a href="http://lombricompostage.wixsite.com/copy-of-lombricompos/bacs-a-compost">http://lombricompostage.wixsite.com/copy-of-lombricompos/bacs-a-compost</a>	80	2	160
Vers + litière (50 €/ 10kg) <a href="http://www.verslalombriculture.fr/pages/tarifs.html">http://www.verslalombriculture.fr/pages/tarifs.html</a>	50	1	50
<b>TOTAL</b>			<b>210 € HT</b>



## Annexe 19 : tableau des charges fixes pour la nouvelle serre

Investissements	Coûts unitaires	Coûts unitaires	Unités	Totaux	Amortissement (années)	Prix/ an HT	Prix/an TTC (€)
	HT	TTC				(€)	
<b>Batiment</b>							
Tunnel horticole 7,80x34m	4339	5206,8	1	5206,8	10	433,9	520,7
Charpente (incluse)							
Accessoires (Fils et crochets) (inclus)							
Bardage pignon et 1/2 lune (= porte ?) (inclus)							
Mécanisme aération avec commande manuelle (écarteur de baches) (inclus)							
Couverture plastique film 4 saisons (incluse)							
Toile d'ombrage	300	360	1	360	5	60,0	72,0
Montage et préparation de terrain (Forfait)	4100,00	4920,00	1	4920,00	10	410,0	492,0
Bache de sol qualité industrielle ultra lourde 240g/m² 8mx12m	112,13	134,56	3	403,68	5	67,3	80,7
Armoire électrique (220 V monophasé)	416,67	500,00	1	500,00	8	52,1	62,5
<b>Investissements poisson</b>							
Bassin 5,3 m3	2004,00	2404,80	5	12024,00	10	1002,0	1202,4
Double perche sortie de bassin	166,67	200,00	5	1000,00	3	277,8	333,3
Pompe eau ARGONAUT J250EC TRIPHASE 30m3 de débit à 6m de hauteur manométrique	563,50	676,20	3	2028,60	8	211,3	253,6
Blower de 15 m3/h P:0,2 bar	1700,00	2040,00	2	4080,00	8	425,0	510,0
Filtre mécanique Proficlear Premium à Tambour pompage Oase	3000,00	3600,00	1	3600,00	8	375,0	450,0
Filtre biologique EUFORIA 3 CHAMBRES EXPERT 15 à 25m3	1430,00	1716,00	1	1716,00	8	178,8	214,5
Forfait plomberie PVC ( coudes, tubes, tés, manchons, vannes)	2250,00	2700,00	1	2700,00	5	450,0	540,0
Nourrisseur poisson à tapis 12H/3kg	120,00	144,00	10	1440,00	3	400,0	480,0
Colonne de dégazage bassin (colonnes + curleurs) col 25s débit 100 litres/min	120,83	145,00	5	725,00	3	201,4	241,7
Colonne de dégazage générale de la cuve de reprise col 50s débit 200 litres/min	166,67	200,00	1	200,00	3	55,6	66,7
Cuve décanteur cylindro conique ( cuve d'1 m3)	700,00	840,00	1	840,00	10	70,0	84,0
Cuve de reprise 3 m3	800,00	960,00	1	960,00	10	80,0	96,0
Isolant mince à bulles, épaisseur 3,5 mm ( environ 50 m² )	160,00	192,00	1	192,00	10	16,0	19,2
<b>Investissements végétal</b>							
Table horticole avec cagettes billes d'argile							
table (7m*1,20m) => (5*160) ( environ 24 cagettes / table)	778,50	934,20	2	1868,40	10	155,7	186,8
cagettes "Bac gerbable grande distribution norme Europe - Longueur 600 mm largeur 400mm" 3 c	18,33	22,00	42	924,00	5	154,0	184,8
billes (sac de 50L) ( 30 L de billes argile ) /cagette	7,77	9,32	25	234,86	3	65,2	78,3
kit irrigation 20 irrigateurs ( 2 /cagette )	24,92	29,90	4	125,58	3	34,9	41,9
Colonnes Zip-grow							
colonnes 76 cm fixations incluses 20% de remise pr 50 tours 10% pour 5 tours	30,00	36,00	0	0,00	5	0,0	0,0
colonne 150 cm fixations incluses	56,25	67,50	5	337,50	5	56,3	67,5
kit irrigation 20 irrigateurs	24,92	29,90	1	29,90	3	8,3	10,0
écoulement 2 tubes PVC 4m d160 avec tampons de visite Nicoll	73,62	88,34	1	88,34	5	14,7	17,7
RAFT							
système RAFT au mètre²	125,00	150,00	26	3945,00	5	657,5	789,0
bulleux (2/m²)	1,54	1,85	53	97,31	3	27,0	32,4
Panneaux de polystyrène Styrodur , 30 mm épaisseur (prix au m²)	6,00	7,20	26	189,36	3	52,6	63,1
NFT sur mesure	0,00	0,00					
système ( diamètre 100 ) + support+ coudes + vannes= prix au ml	25,00	30,00	216	6480,00	5	1080,0	1296,0
pots panier 10 cm (7 pots/ ml )	1,00	1,20	1512	1814,40	3	504,0	604,8
Table horticole avec Pains de coco							
table (7m*1,20m)	778,50	934,20	2	1868,40	10	155,7	186,8
irrigation (2/pain de coco)	24,92	29,90	200	5980,00	3	1661,1	1993,3
Potager lutte biologique							
Système (étagères 20,90€+pots à définir 20€) 6 étagères L80cm par table horticole	34,08	40,90	6	265,40	8	25,6	33,2

Investissements (suite)	Coûts unitaires HT	Coûts unitaires TTC	Unités	Totaux	Amortissement (années)	Prix/ an HT (€)	Prix/an TTC (€)
<b>Fournitures et petits équipements</b>							
Oxy-mètre OXYGUARD	666,00	799,20	1	799,20	3	222,0	266,4
pH-mètre OXYGUARD	660,00	792,00	1	792,00	3	220,0	264,0
Conductimètre HANNA	103,45	124,14	1	124,14	3	34,5	41,4
Spectrophotomètre HANNA INSTRUMENTS + accessoires C045119 HI 96762	292,00	350,40	1	350,40	5	58,4	70,1
Balance de laboratoire Kern 572	630,00	756,00	1	756,00	5	126,0	151,2
Balance pour poissons vivants	510,00	612,00	1	612,00	5	102,0	122,4
Filet ombrage au m <sup>2</sup>	1,60	1,92	120	230,40	3	64,0	76,8
pédiluves	57,75	69,30	2	138,60	3	38,5	46,2
<b>Petit matériel</b>							
Pain de coco	2,25	2,70	100	270,00	1	225,0	150,0
Tube liaison bulleur-pompe à air au mètre	0,32	0,38	100	38,00	1	31,7	142,0
Tuteurs, Ficelles, étiquettes, ciseaux, sécateur....	125,00	150,00	1	150,00	1	125,0	19,0
Epuisette pisciculture	59,17	71,00	2	142,00	1	118,3	70,1
Thermomètre	15,83	19,00	1	19,00	1	15,8	400,0
Produit pédiluve 5 litres	58,40	70,08	1	70,08	1	58,4	37,0
Outils divers (tuteurs ficelles, étiquettes, ciseaux, sécateurs)	333,33	400,00	1	400,00	1	333,3	
bulleurs	1,54	1,85	20	37,00	1	30,8	123,0
<b>Matériel de gestion des risques</b>							
Groupe électrogène 5500w avec 11,5 heures d'autonomie soit 63,25kw (besoin de 59kw/j) permet 24h de panne	512,50	615,00	1	615,00	5	102,5	

### Sans amortissement

Cout annuel HT

60 573,63 €

Cout annuel TTC

72 688,35 €

### Avec Amortissement

Cout annuel HT

11 324,94 €

Cout annuel TTC

13 284,43 €



## Annexe 20 : présentation des aléas – (d'après Benoit, 2016)

Numéro	Libellé incident	Conséquence(s)	Mesure(s) préventive(s)
1	Panne électrique	Arrêt de l'apport en eau et en air → Risques de pertes de l'élevage (anoxie) → Risques de pertes de la production sur NFT grands → Risques de pertes de la production sur substrat inertes modérés	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alarme alerte coupure d'électricité</li> <li>• Groupe électrogène mise en route automatique</li> </ul>
2	Intrusion Vol de production / matériel ou vandalisme	→ Perte directe de production et/ou matériel → Stress des poissons donc moins de croissance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alarme alerte intrusion</li> <li>• Gardiennage</li> <li>• Locaux en « durs » (≠tunnel) pour le stockage de matériel</li> </ul>
3	Fuite d'eau importante	Diminution de l'eau du circuit → Pompe désamorcée et H.S. → Risques de pertes de la production végétale (voir 1) → Risques de pertes de l'élevage → Perte de la qualité de l'eau du circuit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alarme niveau d'eau</li> <li>• Colonne double perche pour l'élevage</li> </ul>
4	Variation qualité de l'eau (pH, O2, Nitrites)	→ Impact alimentation des poissons → Impact productivité des plants → Impacts filtre biologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sonde de mesure automatique</li> <li>• Inérant de Bicarbonate systématique pour stabiliser le pH</li> </ul>
5	Mauvaise météo (Températures, ensoleillement)	→ Impact productivité des plantes → Impact croissance des poissons	<p>Si trop froid/ sombre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chauffage et éclairage d'appoint, ponctuelle</li> </ul> <p>Si trop chaud/ lumineux :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aération, ventilation et filet d'ombrage</li> </ul>
6	Ravageurs / pathogènes	→ Impact productivité des plantes / mortalité → Impact croissance des poissons / mortalité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lutte biologique intégrée</li> <li>• Système de circuit découplé pour permettre un traitement</li> </ul>

