



HAL
open science

Bioponie : étude pour la transition vers une fertilisation organique des cultures hors-sol d'une ferme urbaine

Claire Mouquet

► **To cite this version:**

Claire Mouquet. Bioponie : étude pour la transition vers une fertilisation organique des cultures hors-sol d'une ferme urbaine. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-03919659

HAL Id: dumas-03919659

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03919659v1>

Submitted on 3 Jan 2023

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

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

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers Site de Rennes



UNIVERSITÉ DE NANTES

Mémoire de fin d'études

Année universitaire : 2022-2023

Spécialité : **Biologie Végétale**

Spécialisation (et option éventuelle) :

Filières de l'horticulture et innovations

d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Bioponie : Étude pour la transition vers une fertilisation organique des cultures hors-sol d'une ferme urbaine.

Par Claire Mouquet



Soutenu à Angers le 8 septembre 2022

Devant le jury composé de :

Président : Béatrice Teulat

Maître de stage : Margaux Hobon

Enseignant référent : René Guenon

Président du parcours : Laurent Crespel

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Remerciements

Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe de Cueillette Urbaine présents durant la saison, qui ont grandement participé à mon attrait pour ce stage et ses missions.

Je remercie ma maîtresse de stage Margaux Hobon, pour son aide et sa disponibilité dans la réalisation de mon étude et l'écriture de mon mémoire, mon binôme de site Brice Marlet, pour sa compagnie tout l'été et Julien Girardon pour son aide dans la relecture de mes écrits et ses conseils. Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à Paul, Sélénia, Maéva, Lucile, Bénédicte, Amaury, Arnaud, pour tous les bons moments passés, sur nos toits et sur les divers chantiers, visites et ateliers.

Je remercie également mon tuteur René Guénon pour sa disponibilité et son aide dans l'avancée de cette étude.

Merci comme toujours à ma famille et mes amis les plus proches, pour leur soutien, et leur aide précieuse.

Finalement, je souhaite remercier toute l'équipe enseignante d'Agrocampus Ouest qui a su nous accompagner et nous fournir une formation à la hauteur du monde professionnel.

Table des matières

Glossaire	
Liste des Abréviations	
Liste des Annexes	
Table des Illustrations	
Table des tableaux	
Introduction	1
I.1. Contexte de l'étude	1
I. 2. Présentation de Cueillette Urbaine	2
Problématique	3
Synthèse bibliographique	4
II. 1. La fabrication des engrais	4
II. 2. Les biostimulants	6
II. 3. La gestion de la nutrition/La conduite de culture en bioponie	6
II. 4. Les variétés étudiées	7
II. 4. 1. Fraises Mara des bois	7
II. 4. 2. Basilic Grand Vert	8
Matériels et Méthodes	9
III. 1. Contexte de l'étude	9
III. 1. 1. La zone d'étude	9
III. 1. 2. Contexte de l'expérimentation	9
III. 2. Dispositif expérimental	10
III. 2. 1. Les systèmes de culture	10
III. 2. 2. Les produits	11
III. 2. 2. 1. Les fertilisants	11
III. 2. 2. 2. Les biostimulants	11
III. 3. Protocole expérimental	12
III. 2. 1. Expérience 1 sur les fraises	12
III. 2. 1. 1. Le matériel végétal	12
III. 2. 1. 2. Les modalités testées	12
III. 2. 1. 3. Suivi de l'expérience (Figure 10)	12
III. 2. 1. 4. Les mesures effectuées	13
III. 2. 2. Expérience 2 sur les basilics	14
III. 2. 2. 1. Le matériel végétal	14
III. 2. 2. 2. Les modalités testées:	15
III. 2. 2. 3. Suivi de l'expérience (Figure 12)	15
III. 2. 2. 4. Les mesures effectuées	15
III. 4. Analyses statistiques	15
III. 4. 1. Le cas des fraises	16
III. 4. 2. Le cas des basilics	16
Résultats	16
IV. 1. Expérience 1, les fraises	16
IV. 1. 1. Suivi des solutions nutritives	16

IV. 1. 2. Résultats phénotypiques	17
IV. 1. 3. Analyses organoleptiques	18
IV. 1. 4. Analyses sensorielles	18
IV. 2. Expérience 2, les basilics	19
IV. 2. 1. Suivi des solutions nutritives	19
IV. 2. 2. Suivi de la croissance (hauteur)	19
IV. 2. 2. Masses fraîches aériennes et masses sèches racinaires	20
Discussion	20
V.1. Le suivi des cultures	20
V. 2. Les fraises	21
V. 3. Les basilics	23
V. 5. L'avenir de la bioponie	24
Conclusion	25
Bibliographie	27
Sitographie	29
Annexes	32

Glossaire

Hydroponie: “L'hydroponie est la technique qui consiste à cultiver des plantes hors-sol en immergeant leurs racines dans une solution nutritive.” (Sardare et Amdane, 2013)

Aquaponie: “L'aquaponie est une technique qui combine la pisciculture et la culture de plantes hors-sol en hydroponie et qui se rapproche d'un système de production agricole durable.” (Hobon, 2021)

Aéroponie: “L'aéroponie est une technique de culture, plus ou moins similaire à l'hydroponie, à la seule différence que, les plantes sont cultivées à l'aide de fines gouttes (brume ou aérosol) de solution nutritive dispensées sur leurs racines.” (Sardare et Amdane, 2013)

Bioponie: “La bioponie est une pratique dérivée de l'hydroponie qui consiste à cultiver des plantes hors-sol à l'aide d'une solution nutritive organique et biologique.” (Texier, 2013)

Nutrient Film Technique: Les plantes cultivées ont leurs racines suspendues directement dans une solution nutritive, qui circule en un fin film d'eau sur un plan incliné. (Sardare et Amdane, 2013)

Entreprise à mission: “Une entreprise à mission est une entreprise ou société commerciale qui intègre dans ses statuts un objectif d'ordre social ou environnemental.” (Youmatter, 2021)

Fertilisants minéraux: Substances d'origine minérale naturelle contenant majoritairement phosphate, potassium et nitrates, provenant de l'industrie minière pour répondre aux besoins nutritifs des plantes. (Savci, 2012)

Fertilisants organiques: Substances à base d'extraits végétaux ou minéraux utilisés pour la fertilisation des cultures, contenant les éléments nécessaires à la nutrition des plantes sous forme organique, qui seront dégradés par une population bactérienne afin de devenir assimilables par les racines des plantes. (Texier, 2013)

Circuit fermé: Se dit d'un système de culture hors-sol dont la solution nutritive “usée” n'est jamais rejetée, mais réintroduite dans le circuit initial après une potentielle filtration. (Sardare et Amdane, 2013)

Fertirrigation: “Les éléments fertilisants sont apportés avec l'eau d'irrigation dans le système de culture.” (Leduc, 2020)

Électro-conductivité : “Capacité d'un matériau à laisser passer et conduire le courant électrique. Elle peut se mesurer en milli-Siemens par centimètre (mS/cm) à l'aide d'un conductimètre.” (Bethancourt, 2020)

Culture hors-sol : “Culture dans laquelle les plantes n'ont aucun contact avec le sol. Les racines des plantes se trouvent dans un substrat neutre et inerte, traversé par une solution nutritive riche en éléments minéraux.” (Leduc, 2020).

BBCH: Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie. “Cette échelle décimale sert à la codification des stades phénologiques des mono- et dicotylédones. Elle est divisée en stades de développement principaux et secondaires en se basant sur l'échelle de Zadoks *et al.* (1974) pour les céréales.” (Meier, 2001)

Liste des Abréviations

MFSC: Matières Fertilisantes et Supports de Culture

PPAM: Plantes à Parfums, Aromatiques et Médicinales

R&D: Recherche et développement

GHE: General Hydroponics Europe

BBCH: Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie

EC: Électro-conductivité

pH: Potentiel hydrogène

ATP: Adénosine triphosphate.

Liste des Annexes

Annexe I. Notice d'utilisation du fertilisant minéral Tri Part® pour les cultures hors-sol. (Terra Aquatica, 2022)

Annexe II. Fiche technique du fertilisant organique Pro Organic®. (Terra Aquatica, 2022)

Annexe III. Notice d'utilisation du fertilisant organique Pro Organic® pour les cultures hors-sol. (Terra Aquatica, 2022)

Annexe IV. Notice d'utilisation pour les différents additifs commerciaux de chez Terra Aquatica. (Terra Aquatica, 2022)

Annexe V. Notices des biostimulants de chez Terra Aquatica utilisés dans l'étude. (Photos par Claire Mouquet, 2022, Terra Aquatica, 2022)

Table des Illustrations

Figure 1. Représentation schématique et générale des différentes techniques de culture hors-sol. (Texier, 2013, Claire Mouquet, 2022)

Figure 2. Procédé de minéralisation et immobilisation lors de la dégradation de la matière organique par les bactéries. (Schéma par C. Marsden, supagro, Processus écologiques, 2014 - UVED)

Figure 3. Cartographie des différents stimulateurs identifiés pour améliorer les cultures (classification réalisée par l'Académie des Biostimulants, basée sur les travaux de Faessel *et al.*, 2014).

Figure 4. Diagramme d'assimilation des éléments minéraux en fonction du pH d'une solution sur les bases des travaux de Truog, 1948. (Université Nice Sophia Antipolis, 2008)

Figure 5. Plan d'expérimentation de l'étude, sur la ferme en toiture de l'Arche Végétale, Paris 12ème. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 6. Photo de la zone d'expérimentation et des différentes modalités comparées dans les deux expériences de l'étude. (L'Arche Végétale, Claire Mouquet, 2022)

Figure 7. Présentation du système de culture hors-sol Aéroflo®, de chez Terra Aquatica. (Terra Aquatica, 2019, Claire Mouquet, 2022)

Figure 8. Présentation du système de culture hors-sol Tower Garden®, de chez Juice +. (Juice+, 2021)

Figure 9. Présentation du dispositif expérimental n°1 pour des cultures de fraises sous différentes fertilisations. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 10. Frises chronologiques des différentes étapes de l'expérience 1 effectuée sur les fraises tout au long de l'étude. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 11. Présentation du dispositif expérimental n°2 pour des cultures de basilics sous différentes fertilisations. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 12. Frise chronologique des différentes étapes de l'expérience 2 effectuée sur les basilics. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 13. Courbes représentant l'évolution de la nitrification de l'azote pour les deux modalités en organiques F2 et F3 entre le 19 avril et le 15 mai 2022. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 14. Courbes d'évolution des EC (mS/cm) pour chaque modalité, avec une indication sur les températures ambiantes maximales et minimales (°C). (Claire Mouquet, 2022)

Figure 15. Boxplots obtenus pour la comparaison de la reprise racinaire selon chaque modalité à trois dates différentes. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 16. Graphique indiquant la reprise racinaire de trois groupes de plants de fraises soumis à une fertilisation différente, au cours de 3 dates après la transplantation. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 17. Courbes d'évolution de la masse fraîche moyenne obtenue par fruit selon les dates de récolte au long de l'étude. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 18. Boxplots obtenus pour la comparaison des notes des trois modalités pour chaque critère évalué dans la dégustation sensorielle. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 19. Représentation graphique des moyennes de notation obtenues selon différents critères d'évaluation sensorielles pour chaque modalité de fertilisation différentes. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 20. Courbes d'évolution des EC (mS/cm) pour chaque modalité au long de l'expérience sur les basilics, avec une indication sur les températures ambiantes maximales et minimales (°C). (Claire Mouquet, 2022)

Figure 21. Boxplots obtenus pour la comparaison des hauteurs des plants de basilics observées à trois dates différentes. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 22. Photographie des différentes modalités quelques jours avant la récolte, zone d'expérimentation de l'Arche Végétale, Paris 12. (Claire Mouquet, 2022)

Figure 23. Photographie des différentes modalités quelques jours avant la récolte, zone d'expérimentation de l'Arche Végétale, Paris 12. (Claire Mouquet, 2022)

Table des tableaux

Tableau I. Les éléments nutritifs nécessaires au développement des végétaux, leurs formes d'absorption et leurs fonctions (Fertilisation minérale des cultures, 2007)

Tableau II. Moyennes et médianes de la masse fraîche par fruit pour chaque modalité de l'expérience 1. (Claire Mouquet, 2022)

Tableau III. Analyses organoleptiques fournies par Eurofins pour chaque modalité de l'expérience 1. (Eurofins, 2022)

Tableau IV. Moyennes de notation obtenues pour chacun des critères évalués lors de la dégustation sensorielle de fraises. (Claire Mouquet, 2022)

Tableau V. Moyennes des hauteurs (cm) des plants de basilic à différentes dates le long de l'étude. (Claire Mouquet, 2022)

Tableau VI. Moyennes des masses fraîches aériennes et des masses sèches racinaires par plant pour chacune des modalités à la récolte des basilics. (Claire Mouquet, 2022)

I. Introduction

I.1. Contexte de l'étude

La population mondiale est bientôt à 8 milliards à l'orée 2023, et la proportion de citadins, aujourd'hui autour des 55%, est prévue de presque doubler d'ici 2050 (FAO *et al.*, 2021). Et alors que la famine voyait ses chiffres baisser depuis 2014, la crise Covid 19 en 2020 a déclenché un pic de malnutrition, avec 2.37 milliards d'habitants, soit une personne sur trois, en difficulté nourricière (FAO *et al.*, 2021). À cette augmentation de la population est lié un dérèglement climatique en plein essor, comme en ont fait l'état les derniers rapports du GIEC (Bon pote, 2021). Ils présentent en effet les conséquences de la surconsommation, de la surpopulation et de la surproduction qui se répercutent aujourd'hui sur notre environnement.

C'est dans ce contexte critique de développement durable de la société que l'agriculture urbaine, le développement de cultures en ville, voit sa demande augmenter depuis quelques années. Ce terme est en réalité aussi vieux que l'existence même des villes, comme on peut le voir avec les jardins suspendus de Babylone datant de -600 AV JC (Nahmias et Le Caro, 2012). Face à l'étalement urbain et l'imperméabilisation des sols, des sociétés, associations et collectivités installent tout type de cultures sur les espaces inoccupés ou en friche pour créer des points de ressource locaux et revégétaliser les espaces urbains (Watts *et al.*, 2015). Ces systèmes n'ont pas la prétention de remplacer l'agriculture conventionnelle ou de nourrir les villes, mais permettent une reconnexion des citadins à leur alimentation et aux enjeux que cela implique. Et cela a de nombreux avantages éco-systémiques: réduction des îlots de chaleur, réinsertion de la biodiversité...

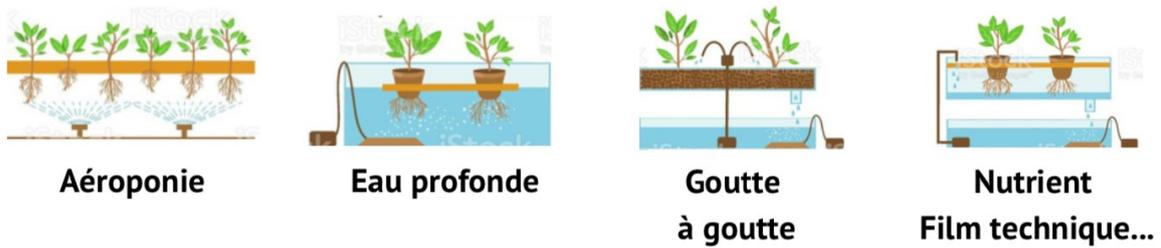
Nombreux sont ces projets qui trouvent leur terrain de jeu en toiture pour répondre au manque d'espace, et cela implique souvent la nécessité de trouver un substitut aux cultures en pleine terre, dites conventionnelles. Les systèmes de culture hors-sol sont souvent adaptés aux toits à portance limitée, présentant une densité importante de plants au mètre carré (180 tonnes de tomates par hectare contre 10 tonnes sous serre dans une étude de Sardare et Amdane, 2013) tout en restant légers (matières plastiques). Ce sont les techniques suivantes: **l'aéroponie**, **l'hydroponie** et **l'aquaponie** (qui ne sera pas détaillée ici) (Figure 1). Ils ne comportent pas de terre, et reposent tous sur un même principe: La circulation, au niveau du système racinaire des plantes, d'une solution nutritive riche de nutriments spécifiques à leurs besoins, dans la plupart des cas en **circuit fermé** (AISHrouf, 2017). Cela permet une nutrition optimisée et peu consommatrice en eau, en accord avec la vision d'une agriculture respectueuse de l'environnement.

Les systèmes de culture hors-sol techniques, tout comme ceux de l'agriculture conventionnelle, connaissent toujours de nombreux leviers d'actions sujets à l'amélioration, dans un contexte environnemental en crise climatique et alimentaire. Un de ces points est exploré dans cette étude, celui de la **fertilisation**. En effet, l'utilisation de **fertilisants minéraux** chimiques est

DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE CULTURE...



...AVEC DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE FERTIRRIGATION...



...ET DIFFÉRENTES FERTILISATIONS.

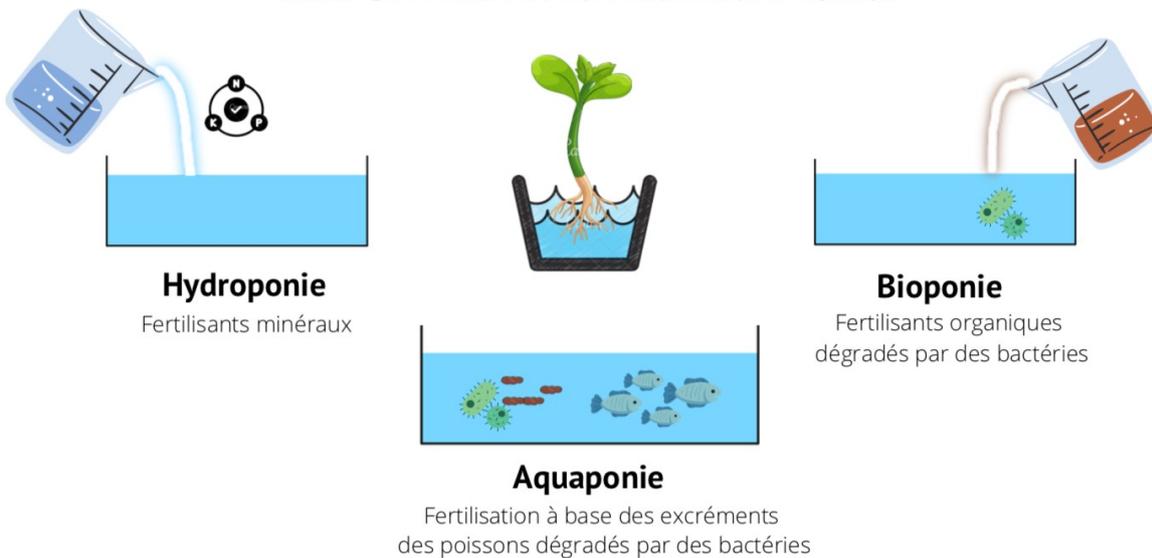


Figure 1. Représentation schématique et générale des différentes techniques de culture hors-sol. (Basée sur les informations du livre de William Texier, 2013. Schémas réalisés par Claire Mouquet sur Canva, 2022).

Ce n'est pas détaillé ici mais des systèmes plus techniques peuvent impliquer des éclairages divers (LEDs...), et être dans des environnements différents (serres, tunnels...). Cela fonctionne un peu comme un catalogue.

répandue en agriculture pour leur efficacité provenant de leur composition en sels minéraux, directement assimilables par les plantes. Cependant, ces produits chimiques ne sont pas considérés comme respectueux de l'environnement, car ces macro et micro éléments ne sont pas biosourcés (Crevette Diplomate, 2020), peuvent impliquer des problématiques géopolitiques entre les pays exportateurs et importateurs (Camprubi, 2015), et ont des conséquences néfastes quand ils se retrouvent dans la nature (Savci, 2012). Afin de tendre vers une production plus durable, il est possible de les remplacer par des fertilisants dits organiques. Cette pratique déjà existante en pleine terre est qualifiée par le terme "**Bioponie**" pour le hors-sol, breveté par William Texier en 2004 (Brevet N° 511 569). Cela signifie que les nutriments pour la plante proviennent de substances naturelles issues de l'économie circulaire pouvant être d'origine végétale, animale ou minérale, et ils deviennent assimilables par les plantes grâce à l'activité biologique de micro-organismes ajoutés dans la solution qui vont permettre leur minéralisation (Ragaavena, 2021). Dans une actualité où la demande tend vers le local et les productions durables, la bioponie pourrait permettre de réconcilier l'agriculture traditionnelle et biologique avec les nouvelles technologies utilisées aujourd'hui sous serre.

I. 2. Présentation de Cueillette Urbaine

L'entreprise Cueillette Urbaine, spécialisée dans l'agriculture urbaine, a été fondée en 2016 par Paul Rousselin dans le but de développer une agriculture nourricière et locale, capable de participer à la dépollution de la ville et de créer du lien social entre ses habitants tout en les reconnectant à leur alimentation. Aujourd'hui, 10 salariés à temps plein y travaillent, répartis sur deux pôles, commercial et opérationnel. Elle est tout récemment déclarée comme **entreprise à mission**, agissant pour le développement vert des villes et la relocalisation des ressources au travers de ses différentes casquettes: conseil, accompagnement, installation, maintenance, production, communication, formations, bureau d'étude. Elle possède de nombreux sites en maintenance dans Paris, et est à l'origine de l'installation de nombreux autres en France et en Europe. En ce qui concerne ses fournisseurs, l'entreprise souhaite établir des relations de confiance avec des partenaires éco-responsables et dans le cadre de cette étude, un partenariat commercial a ainsi été établi avec leurs fournisseurs de produits fertilisants Terra Aquatica, anciennement **GHE** (General Hydroponics Europe). Ainsi, des produits ont été reçus contre une communication auprès des nos autres partenaires et un partage des résultats de cette étude.

Problématique

Cette étude fait ainsi partie d'un processus progressif de l'entreprise Cueillette Urbaine, qui utilise actuellement des fertilisants minéraux, et souhaite passer sa production en fertilisation organique biosourcée, en « bioponie ». Cela irait dans le sens de leur vision, pour une agriculture à la fois hors-sol et éco-responsable, sans aucun intrant chimique de synthèse. Ce changement n'est cependant pas sans risque et nécessite des connaissances et une préparation spécifiques. Dans la littérature, le challenge réside dans l'obtention de rendements similaires tant avec l'organique qu'avec le chimique; ceux-ci sont généralement moins performants (Williams et Nelson, 2016). À fin d'amélioration, une solution peut être l'ajout de **biostimulants**, produits qui permettent d'apporter des éléments complémentaires intéressants au développement de la plante et font office de discussions dans la littérature scientifique (Yakhin, 2017). Des questions de faisabilité entrent alors en jeu, évaluées avec la littérature en vigueur et les limites rencontrées durant l'étude, menant à se poser les questions suivantes:

Quels sont les enjeux d'un passage en fertilisation organique en culture hors-sol pour les produits d'une ferme urbaine en toiture? L'utilisation de biostimulants en association aux fertilisants organiques est-elle pertinente et efficace? Quelle est la fertilisation la plus efficace selon la culture et le système de culture?

Ces expérimentations et leurs analyses seront exposées en détail par la suite. Afin d'évaluer au mieux les enjeux de l'entreprise, des tests sont effectués sur les deux systèmes hydroponiques utilisés par l'entreprise, avec des cultures adaptées; Les tours verticales TowerGarden de Juice Plus + avec des basilics Grand Vert, et les gouttières horizontales Aéroflo®, sur des fraises Mara des Bois. Le long de cette étude, il va être donné de comparer les deux types de fertilisation et d'en ressortir les contraintes et les défis rencontrés. Ainsi, cela permettra de préparer au mieux une transition vers une fertilisation plus durable, tout en respectant les objectifs d'une entreprise en production. Auparavant, un état de l'art sur les différentes fertilisations en hydroponie et les biostimulants est réalisé.

Selon la littérature et les expériences menées précédemment chez Cueillette Urbaine, on s'attend à ce que:

- Les rendements en organiques atteignent des rendements similaires à ceux obtenus en minéral, pour les fraises ainsi que les basilics,
- Les biostimulants démontrent leur efficacité,
- Les qualités organoleptiques soient aussi bonnes en organique qu'en minéral,
- La question de risque/faisabilité soit assez basse pour conseiller un passage en fertilisation organique aux producteurs de Cueillette Urbaine.

Tableau I. Les éléments nutritifs nécessaires au développement des végétaux, leurs formes d'absorption et leurs fonctions. (Fertilisation minérale des cultures, 2007)

Élément	Formes d'absorption	Fonctions principales
Azote	NO_3^- , NH_4^+	Constituant des composés principaux des cellules, des protéines, de la chlorophylle et des gènes.
Phosphore	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	Constituant des gènes, rôle central dans le transfert d'énergie dans la plante et dans le métabolisme des protéines. Constituant de l'ATP.
Potassium	K^+	Aide dans la régulation osmotique et ionique, important pour plusieurs fonctions enzymatiques et dans le métabolisme des protéines et des carbohydrates.
Calcium	Ca^{2+}	Impliqué dans la division cellulaire et joue rôle majeur dans le maintien de l'intégrité de la membrane.
Magnésium	Mg^{2+}	Constituant de la chlorophylle, et facteur dans plusieurs réactions enzymatiques.
Soufre	SO_4^{2-}	Constituant des protéines, des aminoacides et des vitamines. Nécessaire pour la production des plantes à essences.
Fer	Fe^{2+}	Constituant de plusieurs enzymes comme le cytochrome et la ferrédoxine impliquée dans la fixation d'azote et la photosynthèse.
Zinc	Zn^{2+}	Nécessaire pour le fonctionnement correct de plusieurs systèmes enzymatiques importants pour la synthèse des acides nucléiques et dans le métabolisme de l'auxine.
Manganèse	Mn^{2+}	Composant de plusieurs enzymes telles que celles impliquées dans la photosynthèse.
Cuivre	Cu^{2+}	Composant de plusieurs enzymes nécessaires pour la photosynthèse.
Bore	H_3BO_3	Rôle important dans la migration et l'utilisation des glucides. Intervient dans la croissance méristématique.
Molybdène	MoO_4^{2-}	Requis pour l'assimilation normale de l'azote. Nécessaire pour la fixation d'azote et pour la chlorophylle.
Chlore	Cl^-	Essentiel pour la photosynthèse et pour la régulation osmotique des plantes qui se développent dans des sols salins.
Nickel	Ni^{2+}	Constituant de l'enzyme uréase chez les légumineuses, nécessaire pour que les plantes puissent compléter leur cycle de développement.

II. Synthèse bibliographie

II. 1. La fabrication des engrais

Le savoir concernant les besoins nutritifs des plantes est ancestral, tant celui-ci est relié à notre propre alimentation. Ce n'est cependant qu'en 1933 que le docteur Hoagland identifie dans un article de revue les nutriments nécessaires à la croissance des plantes, définissant la base de ce qui, des années plus tard, permet alors de composer des **fertilisants minéraux** solubles et complets. Composés des 17 éléments nécessaires pour la croissance (Tableau 1), ils sont directement assimilables sous forme ionique par les plantes et sont ainsi très efficaces (Sardare et Amdane, 2013), d'où leur grande utilisation. Dans l'histoire, les fertilisants minéraux ont constitué un levier politique et furent sujets de propagande par l'État français dans la période d'après-guerre, arrivant à une consommation et production équivalente en 1950, à 650000 tonnes d'azote par an (Page, 2021). Et depuis les années 60, l'utilisation d'azote inorganique aurait augmenté de 800% (IPCC, 2019), accompagné par une croissance d'utilisation des autres éléments. L'utilisation de ces engrais minéraux participe à l'explosion de la production agricole, qui double entre 1960 et 2010 (Lallemand, 2019). Ces utilisations ont toujours suscité des réserves auprès des agriculteurs et agronomes (Page, 2021), mais ce n'est que depuis 2010 que leur utilisation est en baisse pour l'agriculture conventionnelle (Joly *et al.*, 2014). Ils restent cependant très répandus en culture hors-sol (Bergstrand, 2022), car avec leur forme liquide, ils permettent de mettre à disposition les minéraux sous forme directement assimilable, adaptés à la solution nutritive liquide en circuit fermé dans les systèmes.

Leur utilisation en agriculture conventionnelle a des impacts négatifs à différents niveaux résultant de leur dispersion dans la nature au moment de leur application. En effet, lorsque dispersés dans les cultures, les éléments volatils se retrouvent dans l'air et dans les eaux et participent à la pollution aux particules fines, des eaux souterraines et de la vie dans les sols (Savci, 2012). En agriculture hors-sol, les systèmes sont "fermés" et rien n'est, normalement, déversé dans la nature, et cela peut souvent paraître comme la solution miracle aux problèmes liés aux fertilisants chimiques. Par exemple, l'usine YARA (Fil Api, 2020) met en avant cet argument sur leur site pour l'utilisation de produits chimiques dans ce type de cultures, qu'elle revendique alors comme raisonnée. Cela n'en fait pas moins des ressources non durables; des points négatifs majeurs résident en majeure partie dans leurs techniques de production (Crevette Diplomate, 2020).

Ici, sont présentés les impacts de la production des trois nutriments majeurs N, P, K, des fertilisants chimiques:

- Les engrais azotés synthétiques sont obtenus en transformant l'azote atmosphérique N_2 (diazote) en ammoniaque NH_3 grâce à un procédé chimique nommé Haber-Bosch, en l'associant avec de l'hydrogène H_2 dont la source la plus utilisée en Europe est le méthane CH_4 (Unifa, 2013). Ces procédés sont très coûteux en énergie, et les

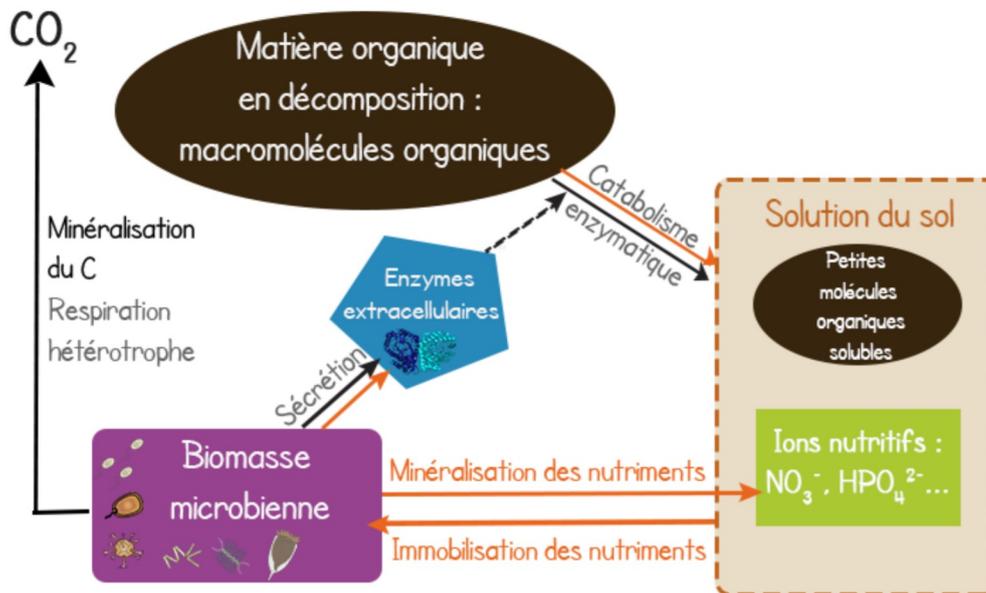


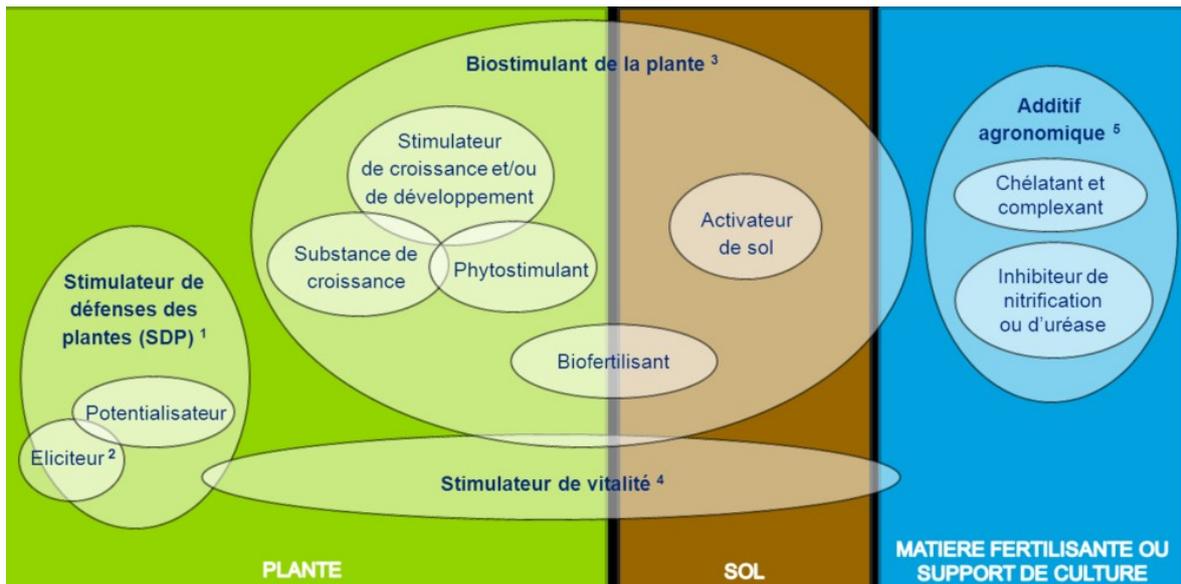
Figure 2. Procédé de minéralisation et d'immobilisation lors de la dégradation de la matière organique par les bactéries. (Schéma par C. Marsden, supagro, Processus écologiques, 2014 - UVED).

émissions de protoxyde d'azote N_2O qui en découlent sont responsables de 50% des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole (Joly *et al.*, 2014).

- Le phosphore utilisé pour la fabrication des engrais est appelé phosphore naturel et provient de l'extraction minière de roches phosphatées broyées (Petit et Jobin, 2005). C'est une énergie fossile, qui doit atteindre ses limites aux alentours de 2035 selon des estimations (Cordell, 2010), où la demande devrait dépasser l'offre. Cela s'ajoute aux conditions de la main-d'œuvre exploitée pour leur extraction (Crevette Diplomate, 2020).
- Le potassium provient lui aussi de l'extraction minière, de sels de potasse présents sous forme de gisements dans des mers chaudes et peu profondes (Unifa, 2013).

La pollution pour la production des engrais se retrouve à plusieurs niveaux, économiques, sociaux et environnementaux. L'extraction des éléments requiert des écosystèmes et une main d'œuvre sur-exploités, et puise dans des ressources fossiles donc limitées, avec des procédés extrêmement coûteux en énergie et en eau (Crevette Diplomate, 2020). Celle-ci interfère avec les relations internationales, où les pays se disputent l'exploitation et la vente de ces éléments minéraux, l'or de l'agriculture (Camprubi, 2015). De plus, leur fabrication par association de différents composés peut générer l'émission de gaz qui en trop grande quantité deviennent nocifs, comme le méthane, et le protoxyde d'azote (Usbek & Rica, 2019). Enfin, les usines à leur origine sont bien souvent responsables de rejets dans la nature (Fil Api, 08/07/20). Cette rapide analyse regroupe de nombreuses thématiques complexes et mériterait d'être plus détaillée.

À ces engrais minéraux, comme mentionné précédemment, il existe de nombreuses alternatives, qui sont d'ailleurs déjà assez répandues. Celles-ci peuvent concerner toute la récupération de déchets organiques dont un jus riche en minéraux peut être extrait (Phibunwatthanawong et Riddech N, 2019). Une des difficultés rencontrée en hors-sol avec ces engrais organiques concerne les molécules grossières qui composent ces ceux-ci, non assimilables par les plantes dans cette forme et pouvant obstruer les systèmes. Ainsi, le principe de la bioponie mentionné précédemment va être de recréer un mini éco-système afin de stimuler leur dégradation grâce à l'association de populations de bactéries qui s'installent dans un biofiltre et réalisent un processus de minéralisation (Figure 2). Il existe une large proposition de fertilisants organiques pour l'hydroponie sur le marché, produits qualifiés de "complets" en termes de nutrition. Ceux-ci peuvent avoir de multiples provenances, minérale, animale ou végétale, et sont généralement produits via les processus de minéralisation simples, requérant déjà l'action de micro-organismes. Une fois la minéralisation terminée, ils vont pouvoir contenir des phytohormones, des acides organiques et des facteurs de croissance des plantes. Des déchets riches en carbone comme la mélasse (sous-produit issu des cultures de sucre de canne et betterave sucrière), sont riches en vitamines et minéraux (Phibunwatthanawong et Riddech N, 2019).



1 (RMT Elicitra, 2013), 2 (Fardeau & Jonis, 2003), 3 (EBIC, 2014), 4 (MAAF, 2012), 5 (Arcadia, 2014).

Figure 3 Cartographie des différents stimulateurs identifiés pour améliorer les cultures. (Classification réalisée par l'Académie des Biostimulants, basée sur les travaux de Faessel et al., 2014)

II. 2. Les biostimulants

Les moindres rendements observés en fertilisation organique font l'objet de nombreuses discussions dans la littérature. Certains suggèrent (Texier, 2013) l'utilisation de produits qualifiés de **biostimulants** pour stimuler l'assimilation des nutriments par les racines des plantes, accélérer leur dégradation, ou pour combler ces lacunes en stimulant le métabolisme des plantes par l'apport de nutriments supplémentaires. Ils peuvent appartenir à la catégorie des additifs, à l'exception près qu'ils sont d'origine biologique, et non chimique. Ils se distinguent des engrais par leur composition. En effet, les engrais contiennent tous les éléments minéraux nécessaires pour nourrir la plante. Les additifs eux, aussi appelés éliciteurs, n'ont pas cette vocation. Ils comprennent tout composé permettant d'améliorer la croissance de la plante par diverses manières (Texier, 2013). Depuis le 25 juin 2019, un nouveau règlement Européen UE 2019/1009 est entré en vigueur, pour l'harmonisation de toutes les **Matières Fertilisantes et Supports de Culture**. Effectif le 16 juillet 2022, il donne finalement leur place aux biostimulants. On retrouve sur le site internet de l'Académie des Biostimulants une définition officielle de la commission européenne: « Un biostimulant des végétaux est un produit qui stimule les processus de nutrition des végétaux indépendamment des éléments nutritifs qu'il contient, dans le seul but d'améliorer une ou plusieurs des caractéristiques suivantes des végétaux ou de leur rhizosphère:

- L'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs;
- La tolérance aux stress abiotiques;
- Les caractéristiques qualitatives;
- La disponibilité des éléments nutritifs confinés dans le sol et la rhizosphère. »

Encore aujourd'hui, sa définition reste source de débats, car nombreux sont les termes existants pour qualifier les produits améliorant les cultures (Figure 3), et il n'existe pas de définition mondiale officielle.

II. 3. La gestion de la nutrition/La conduite de culture en bioaponie

Le milieu de culture en hors-sol est neutre et cela rend la gestion de la nutrition primordiale. En cas de manque, il n'y a aucune possibilité de substitution ou de compensation comme dans les sols: l'eau ne comporte que ce qu'on y apporte. Celle-ci peut être contrôlée au travers de l'électro-conductivité EC, et du potentiel hydrogène pH. Le pH d'une solution nutritive doit, en théorie, se situer entre 5,5 et 6,5 (Texier, 2013). Un dépassement de cette fourchette peut mener à des carences ou excès dans certains éléments, comme on peut le voir avec la table d'absorption des éléments en fonction du pH (Figure 4).

L'électro-conductivité est un moyen simple et efficace de contrôler la concentration en sels minéraux de la solution nutritive. Ces ions sont chargés et génèrent des courants électriques conduits par l'eau. C'est ce que le conductimètre va pouvoir détecter, indiquant ainsi une valeur

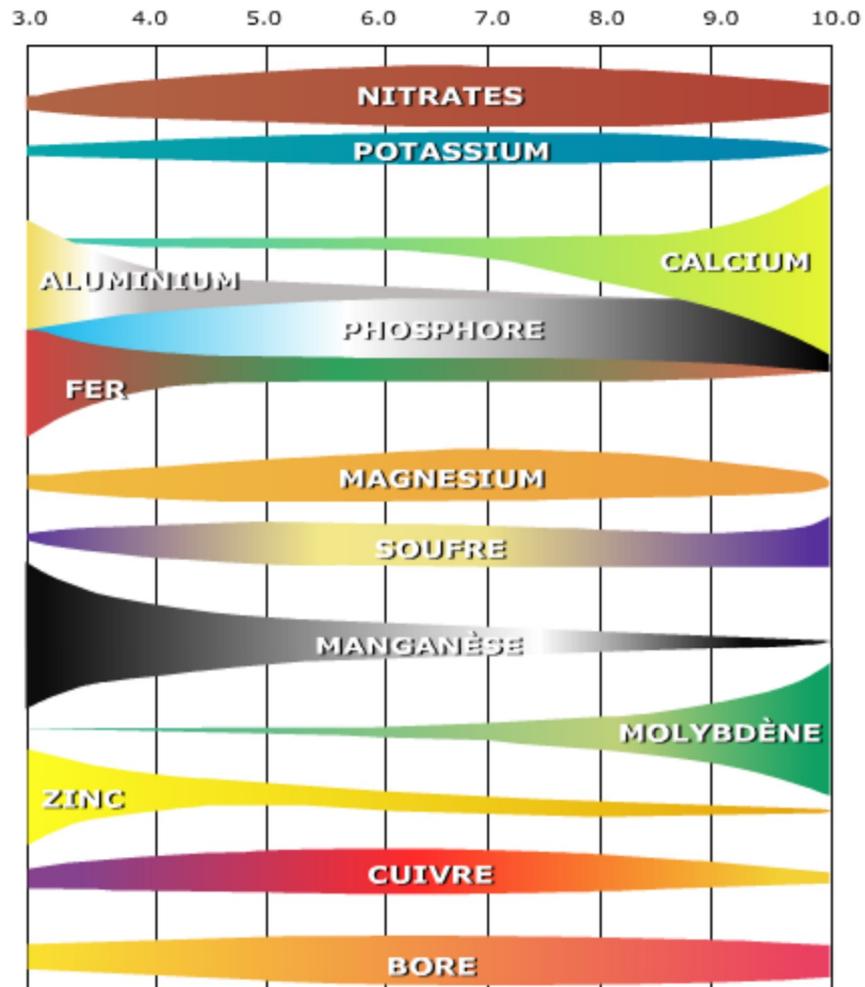


Figure 4. Diagramme d'assimilation des éléments minéraux en fonction du pH d'une solution sur les bases des travaux de Truog, 1948. (Université Nice Sophia Antipolis, 2008)
 Les couleurs qui changent pour un même élément informent sur la toxicité variable de celui-ci sous différent pH. Les formes ici sont considérées comme symétriques.

en mS/cm, pouvant représenter la quantité d'ions présents dans la solution, et donc de nutriments. Il existe donc des valeurs de référence indiquées dans la littérature selon les variétés et selon l'étape du cycle de culture. L'EC est sujette aux aléas climatiques. Par exemple, si la température augmente, les plantes vont absorber plus d'eau que de nutriments, alors l'EC va augmenter. Ainsi, cela demande une attention particulière.

En bioponie, ces critères fonctionnent différemment. En effet, le pH peut atteindre 7,5 (Texier, 2013, Sardare et Amdane, 2013), sans poser de problèmes, bien qu'il soit tout de même conseillé de le rabaisser par précaution. La gestion de l'EC devient elle plus complexe: Les nutriments apportés ne sont pas tous sous leur forme ionique, et sont souvent liés entre eux en gros composés ioniques, avant d'être dégradés. Ainsi, l'EC en bioponie n'est pas réellement représentative des éléments présents dans la solution.

Pour permettre la dégradation de ces composés en ions assimilables par la plante, il faut la présence de micro-organismes spécifiques. Ceux-ci vont consommer le C (Carbone) des composés et ainsi libérer les ions présents et des nutriments pour leur propre métabolisme. Parmi ceux-ci, certains vont alors être assimilables par les racines de plantes (Figure 2). Pour que ces micro-organismes s'installent, il faut rendre l'environnement propice, et il est important qu'une étape soit réalisée avant la transplantation des plants dans le système: la nitrification de l'azote. En effet, cela va permettre d'assurer que la quantité d'azote nécessaire soit déjà présente lorsque les plants sont ajoutés, et leur reprise racinaire pourra être efficace. Les plantes, à l'exception des légumineuses, assimilent l'azote par leurs racines sous sa forme nitrate, NO_3^- (Bethancourt, 2021). Cette forme apparaît grâce au processus de nitrification, réalisé par les bactéries du sol. Pour que la nitrification de l'azote soit complète, les nutriments et les micro-organismes doivent être ajoutés plusieurs jours à l'avance, afin que ces derniers puissent effectuer le phénomène de dégradation de l'azote. L'azote organique contenu dans la matière organique va être soumis à une ammonification, donnant de l'ammonium NH_4^+ , qui va pouvoir être dégradé par des bactéries nitrifiantes pour donner des nitrites puis des nitrates. Le nitrate est la forme de l'azote assimilable par les racines des plantes. Afin de permettre la présence de ces bactéries, il est important qu'elles trouvent un milieu où se développer, et comme mentionné précédemment, c'est ce qui est appelé en bioponie le **biofiltre**. Celui-ci représente un milieu propice pour l'installation des bactéries.

II. 4. Les variétés étudiées

II. 4. 1. Fraises Mara des bois

En 2015, la France a consommé environ 110000 tonnes de fraises (Interfel, 2016), et ces chiffres sont en augmentation. En parallèle, elle produit la même année 47 000 tonnes de ce fruit, ce qui la place en 7ème producteur mondial. L'offre reste cependant faible vis à vis de la demande, avec presque deux tiers de la consommation qui est importée des pays voisins, ainsi

les fraises représentent un bon marché pour un fruit à bonne valeur ajoutée (Label Rouge, 2017). La fraise est adaptée à la culture hors-sol (40% de la production française est aujourd'hui en hors-sol selon Caldor, 2020) permettant de nombreux avantages de production. Cultivée en ville, elle représente une alternative de fraises ultra-locales, sans pesticides, répondant aux enjeux d'aujourd'hui. La solution nutritive peut donc être adaptée à la production de petits fruits comme les fraisiers. Selon Agriréseau (2001), le cocktail idéal pour une fertilisation des fraises est 1 N - 0,5 P₂O₅ - 1,5 K₂O - 0,2 MgO - 0,6 CaO. Cependant les besoins nutritifs varient au cours du cycle et vont de concert avec les conditions environnementales. En période végétative, une température de 25°C donne l'équilibre entre les deux sources d'azote, NO₃⁻ et NH₄⁺, qui peuvent alors être assimilées par les racines et répondre aux besoins en azote du fraisier. Mais l'ammonium une fois assimilé est très réactif et doit être dégradé rapidement pour ne pas être nuisible, afin d'être fixé dans les acides aminés puis envoyés jusqu'aux organes puits. Le nitrate lui avec sa charge négative s'associe avec les cations et est lui aussi transporté dans les parties aériennes. Lors de la fructification, les besoins des fruits sont plus importants en potassium, et c'est l'élément le plus présent dans les fraises. Cela provoque l'augmentation des charges positives dans les tissus du fruit (K⁺), et, en simplifié, cela permet d'y attirer l'eau et les ions à charges négatives tels les nitrates, phosphores ou soufre. Ainsi, une forte fertilisation potassique a tendance à aller de pair avec une augmentation du taux de sucre et de vitamine C, gage de qualité pour les fraises (Agriréseau, 2001). Et cela a tendance à augmenter d'autant plus avec la température et la consommation azotée. Une fertilisation minérale est adaptable à ces besoins variables en modifiant les quantités ajoutées de chaque partie du fertilisant. Cependant, une fertilisation organique et son principe reposant sur la création d'un mini éco-système peut permettre à la plante et à la solution d'interagir automatiquement selon les besoins du végétal. *Fragaria ananassa*, la variété Mara des bois, est une variété de fraise **remontante**, réputée en France pour son goût très sucré de fraises des bois et est testée dans cette étude. Ahmed *et al.*, obtiennent dans une étude de 2021 des résultats similaires en rendement pour des fraises *Fragaria ananassa* sous une fertilisation organique par rapport à une fertilisation minérale. Ils insistent sur la demande grandissante de fraises biologiques poussée par les préoccupations des consommateurs, et recommandent ainsi le développement de l'utilisation d'engrais organiques pour les fraises hydroponiques.

II. 4. 2. Basilic Grand Vert

Le basilic, *Ocimum basilicum* L., est un produit emblématique des **PPAM**, la filière des plantes à parfum, aromatiques et médicinales (Collin, 2020). Plante annuelle et herbacée appartenant à la famille des lamiaceae, elle représente celle des PPAM dont les quantités vendues sont les plus importantes avec 1 144 t en 2018) et est la deuxième espèce en valeur (France AgriMer,

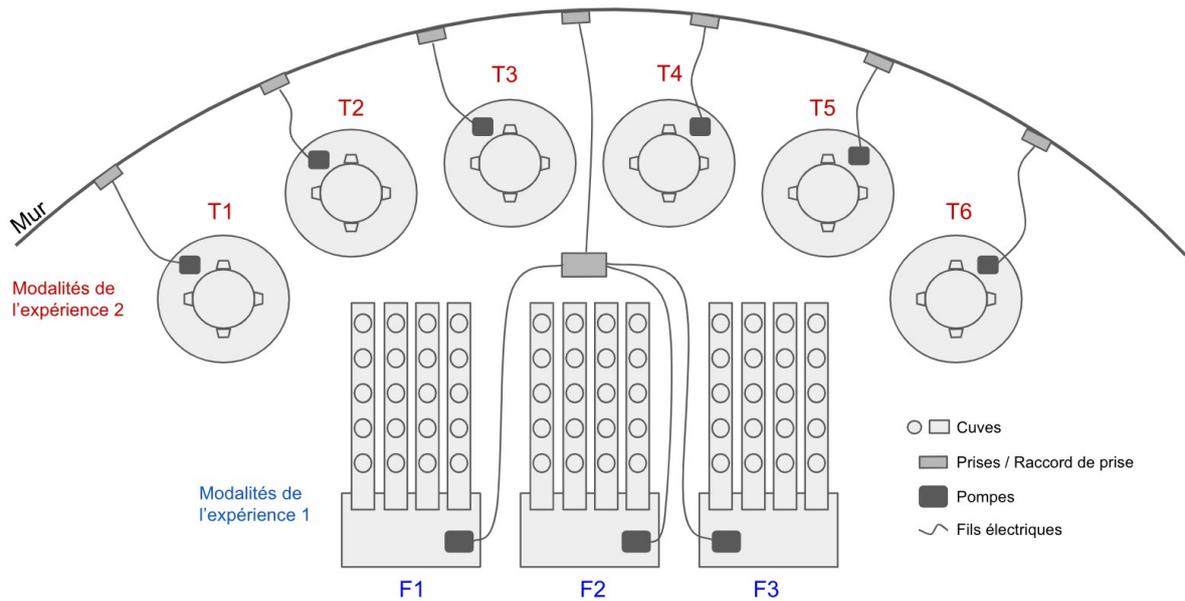


Figure 5. Plan d'expérimentation de l'étude, sur la ferme en toiture de l'Arche Végétale, Paris 12ème. (Claire Mouquet, 2022)



Figure 6. Photo de la zone d'expérimentation et des différentes modalités comparées dans les deux expériences de l'étude. (L'Arche Végétale, Claire Mouquet, 2022)

2018). C'est également un produit à forte valeur ajoutée, de par ses diverses utilités possibles, très courant en culture hors-sol et répandu en agriculture urbaine. Dans cette étude, c'est le Basilic Grand Vert, *Genovese*, qui est concerné, bien connu par la littérature. Nombreuses cultures de basilics en hydroponie utilisent des fertilisants minéraux encore une fois pour la facilité d'application, cependant encore une fois la demande de produits bio-sourcés augmente avec l'éveil des consciences des consommateurs. Pour cela, de nombreuses études testent l'efficacité de fertilisants organiques et les résultats sont très variables. L'étude de Moncada *et al.*, 2021, regroupe nombreux des résultats d'études et effectuent des tests qui s'avèrent donner des résultats en faveur de la fertilisation minérale. La variabilité de l'efficacité des fertilisants organiques est soulignée, et cela affecte directement la production végétative des basilics. Il semblerait que l'obtention de rendements satisfaisant avec la culture de basilics en organique réside dans la gestion de la fertilisation, et le fonctionnement de la minéralisation dans la solution selon la température (Moncada *et al.*, 2021).

III. Matériels et Méthodes

III. 1. Contexte de l'étude

III. 1. 1. La zone d'étude

Avec l'édition des Parisculteurs de 2018, Cueillette Urbaine a pu installer une ferme de 1000m² sur le toit de « Cuisine mode d'emploi » (école de cuisine créée par Thierry Marx, chef cuisinier français), fournissant en fruits et légumes locaux l'école de cuisine, des restaurants et des particuliers. Elle est la vitrine de l'entreprise avec la présence des trois modules de production commerciaux (gouttières hydroponiques et aquaponiques, tours aéroponiques et bacs potagers), ainsi qu'une zone destinée à la **R&D**, où se déroule cette étude. Celle-ci se situe en bout de toiture et se compose de 6 tours hydroponiques de 28 trous (7 étages de 4 trous) ainsi que 3 modules de 4 gouttières hydroponiques de 5 trous chacune. Chaque modalité possède sa propre pompe ainsi que son propre raccord électrique (Figure 5). Elles sont alimentées en eau manuellement.

III. 1. 2. Contexte de l'expérimentation

La saison dernière (2021), Axelle Bethancourt a réalisé une étude durant son stage incluant l'application du fertilisant organique Pro Organic® de chez Terra Aquatica pour des cultures de salade. Celui-ci a démontré son efficacité. Cependant, le rendement reste plus faible qu'avec le fertilisant minéral Tri Part®, de chez Terra Aquatica également. Dans cette étude, il va être testé d'obtenir de bons rendements et de compenser ces lacunes en associant le Pro Organic® avec des biostimulants. Afin de représenter au mieux les cultures de l'entreprise, les tests sont

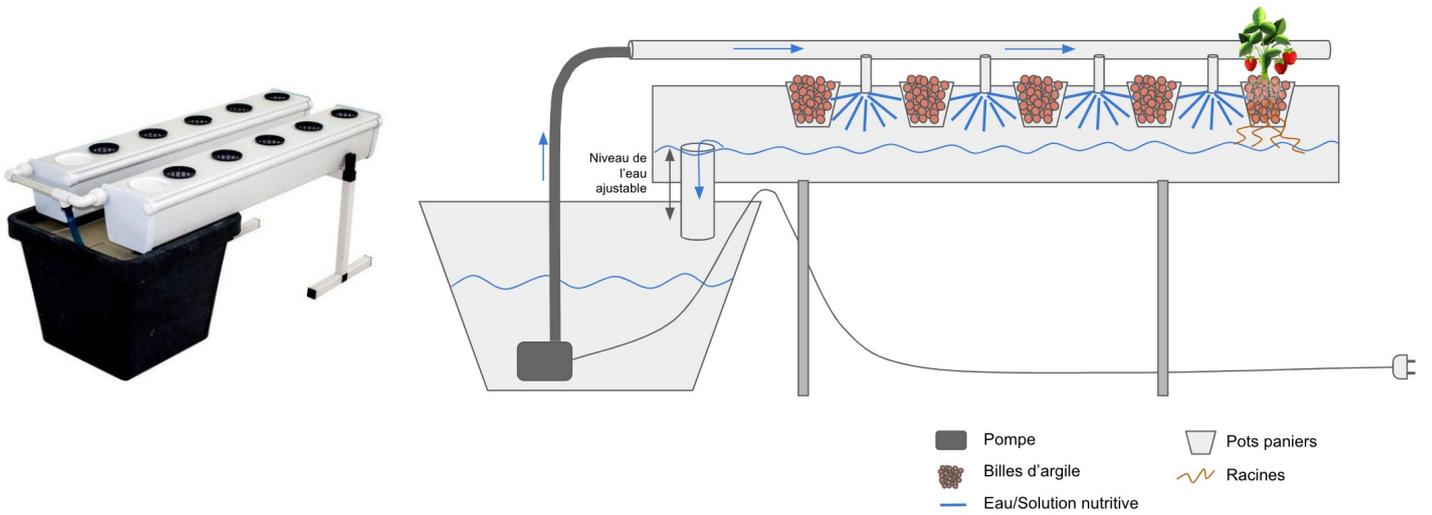


Figure 7. Présentation du système de culture hors-sol Aéroflo®, de chez Terra Aquatica. (Claire Mouquet, 2022).

a) Photo d'aéoflos (Terra Aquatica, 2019). b) Schéma descriptif du fonctionnement des aéoflos

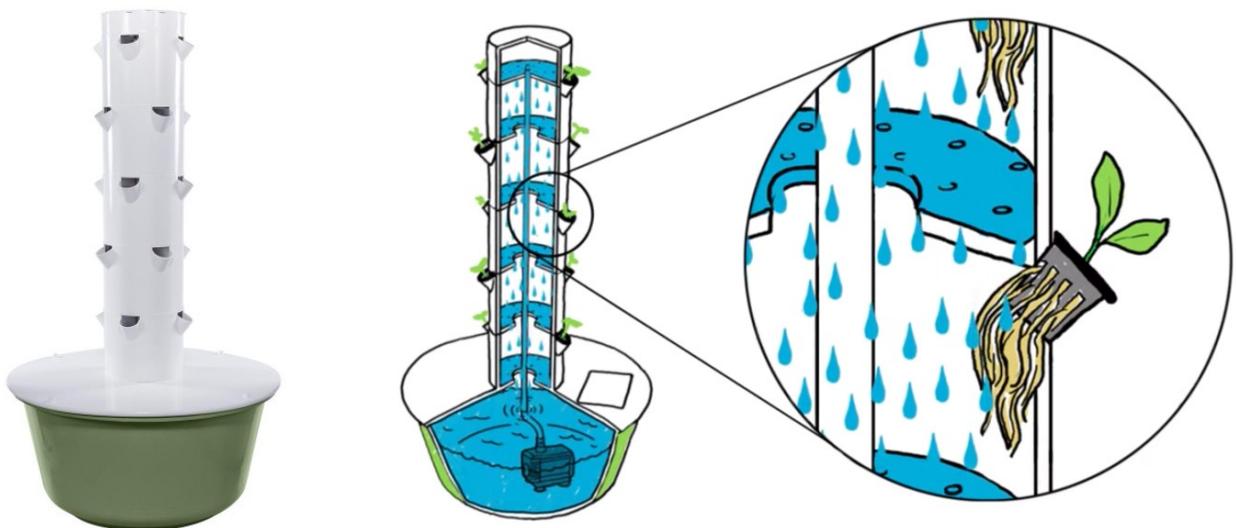


Figure 8. Présentation du système de culture hors-sol Tower Garden®, de chez Juice +. ("See How Tower Garden FLEX Works", youtube.com, Tower Garden, 2021)

a) Photo d'une Tower Garden à 5 étages (Juice +, 2020). b) Fonctionnement d'une Tower Garden

effectués cette année sur certaines de ses cultures phares, à savoir les fraises et les basilics, chacune dans son système le plus adapté. Cela permet d'évaluer les produits déjà testés auparavant, qui sont validés également par le département R&D de Terra Aquatica. Cependant, il était important de les tester dans nos conditions de culture, qui sont différentes de celles de Terra Aquatica: la ferme est en toiture, à l'air libre, dans Paris. Les cultures sont donc sujettes aux aléas météorologiques, changements de températures, vents, pluies, bioagresseurs. Ainsi, comme présenté sur le schéma en Figure 6, les modalités représentent des fertilisations différentes à comparer.

Ces deux expériences permettent donc de vérifier deux axes différents:

- Pour la culture des basilics, des expériences dans l'entreprise avaient déjà été réalisées sur ces systèmes de culture, les Tower Garden (Bethencourt, 2021). Elles avaient démontré un fonctionnement du Pro Organic®, mais avec un rendement moins bon qu'avec le Tri Part®. Deux objectifs entrent en jeu ici; tester ces produits sur une nouvelle variété de légumes feuilles, de PPAM, les basilics. Et obtenir des rendements égaux ou meilleurs en Pro Organic® grâce à l'association de biostimulants.
- Pour la culture des fraises, les systèmes Aéroflo® avaient déjà été testés, mais pour des légumes feuilles, salades. C'est donc la première fois que des petits fruits sont expérimentés en Pro Organic® par Cueillette Urbaine sur leur site R&D. Le but de cette expérience sera alors d'obtenir des rendements efficaces en Pro Organic®, et d'évaluer l'association de biostimulants, tout en comparant avec une fertilisation minérale en Tri Part®.

III. 2. Dispositif expérimental

III. 2. 1. Les systèmes de culture

Aéroflo® de chez Terra Aquatica

Les systèmes de culture horizontaux de Cueillette Urbaine sont les Aéroflo® de chez Terra Aquatica. Chaque module est composé d'une cuve pour 4 gouttières de 5 trous (Figure 7). L'eau présente dans la cuve est envoyée jusqu'aux racines grâce à des capillaires disposés tout le long de la gouttière, et celle-ci s'écoule à nouveau dans la cuve.

TowerGarden de chez Juice Plus +

Les systèmes de culture verticaux de Cueillette Urbaine sont les Tower Garden, produites par Juice plus Insight. La tour est composée d'une cuve de 70L, dont l'eau est envoyée en haut grâce à une pompe d'aquarium, puis celle-ci s'écoule dans les percolations tout le long des étages afin d'arroser les racines des plantes (Figure 8). L'oxygénation nécessaire pour les racines est intrinsèque à la circulation de l'eau qui s'écoule telle une cascade, cependant cela n'est pas qualifié d'aéroponie car le flux est liquide.

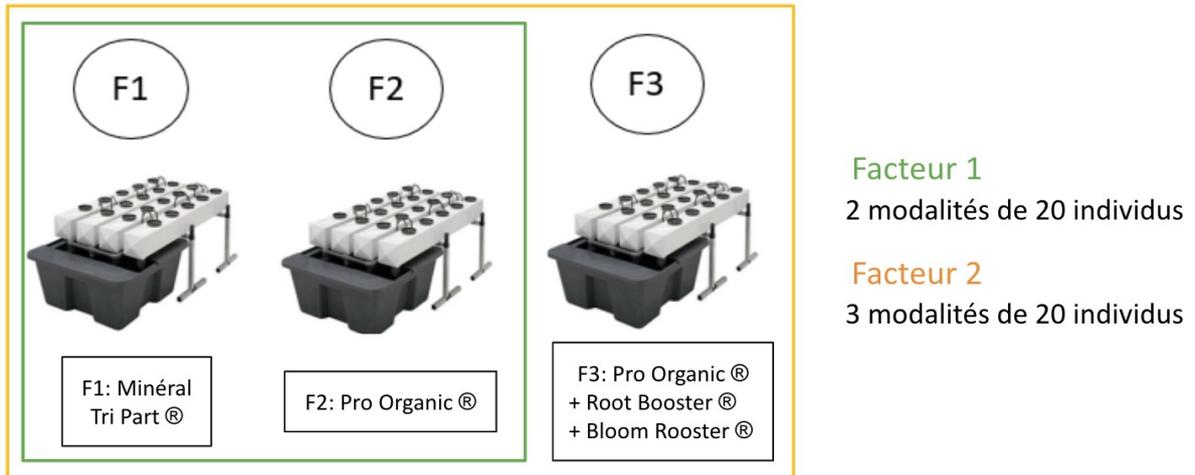


Figure 9. Présentation du dispositif expérimental n°1 pour des cultures de fraises sous différentes fertilisations (Claire Mouquet, 2022). *Comparaison de différents cocktails de fertilisation afin d'évaluer l'efficacité d'association de biostimulants de floraison avec une fertilisation organique sur un légume fruit en hydroponie.*

III. 2. 2. Les produits

III. 2. 2. 1. Les fertilisants

- Fertilisant minéral Tri Part®

Il est composé de trois parties liquides complémentaires, dont les dosages sont à varier en fonction du stade de croissance du plant. Il fut inventé en 1976 par le docteur Carl Herrman pour GHE, en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Davis en Californie (GHE, 2020). La partie Micro contient des micro- et sub-éléments ainsi que des macro-éléments complémentaires sous forme de chélates. La partie Grow stimule le développement structurel et végétatif, renforce le système racinaire et fournit l'essentiel de l'azote, du potassium et des minéraux secondaires. Et enfin la partie Bloom fournit le phosphore et le potassium sous la forme requise par les plantes pour favoriser le développement racinaire et augmenter la vitalité pendant la croissance. La notice d'utilisation est présentée en annexe I.

- Fertilisant Organique Pro Organic®

Pro Organic® est un engrais produit par l'équipe de recherche de Terra Aquatica (anciennement BioSevia® à l'époque de GHE), se conformant à la réglementation européenne sur l'agriculture biologique N°834/2007. Selon sa fiche technique (Annexe II), il est composé d'un grand nombre de larges molécules organiques afin de recréer la fertilité naturelle retrouvée dans les sols. Il contiendrait déjà de l'acide fulvique et des acides humiques qui augmentent la capacité d'assimilation des plantes. Les détails sur sa composition et sa provenance restent très vagues, En hydroponie, il s'utilise en association indispensable avec des microorganismes Trichoderma, contenus dans une poudre fournie par Terra Aquatica également. La notice d'utilisation est présentée en annexe III.

III. 2. 2. 2. Les biostimulants

Terra Aquatica propose de nombreux produits, mais étant donné la diversité des produits présents sur le marché, avec le souhait de trouver le produit le plus adéquat pour les cultures de Cueillette Urbaine, une étude de marché a été réalisée (non présentée ici) afin de trouver le produit adéquat parmi ceux présents sur le marché. Les critères définis sont les suivants: Biosourcé, français, améliorant la croissance et le rendement, et applicable en hydroponie. Cela a permis de réaliser un tri et finalement, l'élaboration d'un partenariat commercial avec Terra Aquatica et leur département R&D a permis de tester leurs produits, qui sont en accord avec les critères précédents.

Ainsi, les suivants furent utilisés (Annexe V):

- Roots Booster®: Activateur racinaire et stimulateur de croissance, contenant des vitamines, des enzymes, des acides organiques et humiques.
- Bloom Booster®: Activateur de floraison, contenant des activateurs de transport biologiques.

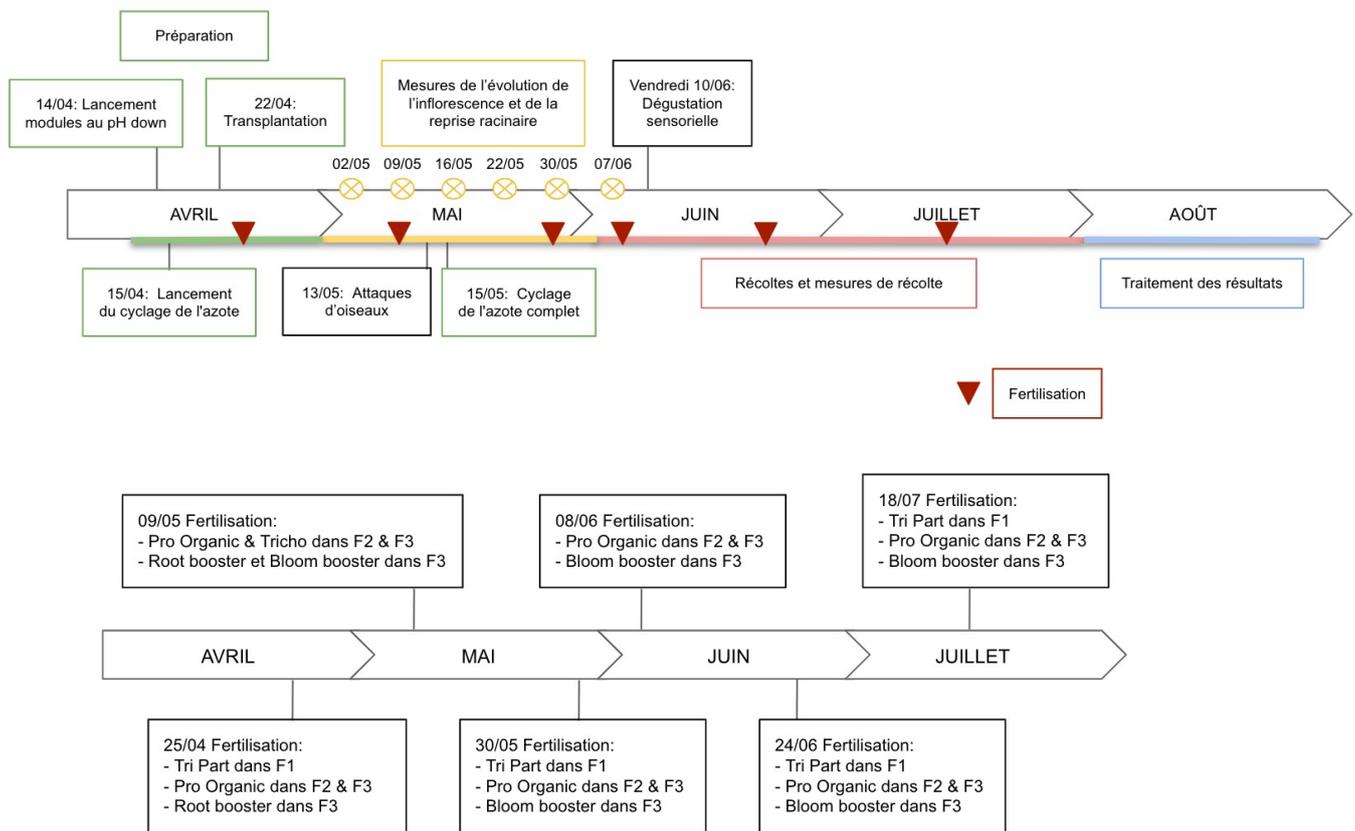


Figure 10. Frises chronologiques des différentes étapes de l'expérience 1 effectuée sur les fraises tout au long de l'étude. (Claire Mouquet, 2022)

- Urtimax®: Purin d'ortie liquide, riche en silice et en fer et autres nutriments, éliciteur naturel.
- Sea Weed®: Puissant éliciteur et biostimulant de préfloraison, 100% extrait d'algues *Ascophyllum nodosum*.
- Humic®: Acides humiques provenant de la sciure de bois, qui améliorent l'absorption des engrais et stimulent l'activité microbienne.

III. 3. Protocole expérimental

Les deux expériences réalisées dans cette étude sont indépendantes. Dans les deux cas, les modules furent nettoyés au karcher, puis passés au pH down une fois montés. Ensuite, pour les modalités en organique, une nitrification de l'azote fut réalisée de la même manière pour les deux modalités en organique, avec du Pro Organic® et du TriKoLogic®. Des mesures ont été prises durant la période de nitrification afin de contrôler le passage des nitrites en nitrates, grâce à des tests colorimétriques JBL®, évaluant les concentrations en NH₄, NO₂ et NO₃. Les pH et l'EC furent aussi contrôlés.

III. 2. 1. Expérience 1 sur les fraises

III. 2. 1. 1. Le matériel végétal

Les plants furent livrés par Plants-Pro, sous la forme de plants hydroponiques de Mara des bois, racines nues dans du sable, en fin de stade 4 selon la classification des stades phénologiques BBCH (Meier, 2001).

III. 2. 1. 2. Les modalités testées

Trois modalités de 20 individus sont comparées, détaillées en Figure 9. Les biostimulants testés ici sont le Root Booster® et le Bloom Booster® appliqués dans la modalité F3. Ceux-ci ont été choisis pour leurs actions: Root Booster® pour aider à la reprise racinaire, utile pour une transplantation de plants adultes comme ici, et du Bloom Booster® pour pousser la fructification, utile dans le cas des fraises. Les compositions exactes ne sont pas connues.

Deux facteurs furent évalués:

- Facteur 1: Quelle différence d'efficacité entre organique et minéral?
- Facteur 2: Quel est le cocktail le plus efficace?

III. 2. 1. 3. Suivi de l'expérience (Figure 10)

Les trois cuves ont été disposées et ont tourné au pH down pendant 24 heures, afin de purifier au mieux les modules. Puis, les deux modalités en organiques, F2 et F3, ont été vidées puis re-remplies afin de commencer la nitrification de l'azote, tandis que F1 tournait encore au pH down. Les cuves sont remplies au même niveau d'eau, atteignant les 50L. Le pH de l'eau de

ville étant à 8,5, 10 mL de pH down ont été ajoutés afin de rendre le pH adapté à l'ajout de bactéries. Finalement, le pH atteint les environs d'un pH 7,5, considéré comme suffisant (Texier, 2013). Selon la notice d'utilisation du Pro Organic, 0,5mL/L de Bloom et de Grow doivent être ajoutés pour la nitrification. Ainsi, 25 mL de chaque ont été ajoutés dans F2 et F3. En association, 4 grammes de Trichoderma sont ajoutés sur un biofiltre de type Matrix Media. Après 10 jours, F1 est vidée puis remplie, et les fraises sont transplantées le vendredi 22 avril 2022 au matin, sous un grand soleil. Les racines ont été nettoyées et chaque plant transplanté dans un pot panier au fond coupé afin de laisser pendre les racines, et maintenu par des billes d'argiles. Le 13 mai, une attaque d'oiseaux a eu lieu, ravageant de nombreux plants. Plusieurs sont morts, ne laissant plus que 17 plants pour F1, toujours 20 plants pour F2 et 13 pour F3. Cela est pris en compte dans l'interprétation des résultats. La fertilisation fut régulière en réponse aux besoins des plantes, selon les valeurs d'EC indiquées par l'électro conductimètre.

III. 2. 1. 4. Les mesures effectuées

Cette étude a pour volonté d'évaluer l'utilisation de fertilisants organiques à la place de fertilisants minéraux pour les cultures d'une entreprise d'agriculture urbaine en toiture. Ainsi, il est intéressant d'évaluer ce qui importe à l'entreprise: le rendement, par une analyse phénotypique, et l'appréciation des consommateurs, au travers d'une analyse sensorielle à l'aveugle. De plus, afin de justifier physiologiquement les différences observées, une analyse organoleptique a été réalisée à l'aide d'un laboratoire spécialisé.

- Les analyses phénotypiques:

Pour évaluer une potentielle action des biostimulants dans la modalité F3, il est intéressant d'observer la reprise racinaire selon les modalités. Pour cela, des notes ont été attribuées selon l'état des racines et l'apparition de nouvelles racines. Une note sur 5 est attribuée pour chaque plant de chaque modalité: 0: pas du tout de nouvelles racines, 1: premières nouvelles racines apparues, 2: plusieurs nouvelles racines, 3: reprise bien répandue, 4: reprise presque complète, 5: reprise des nouvelles racines terminée. Cela a finalement permis d'obtenir une moyenne et de comparer leur évolution à trois dates de mesures après la transplantation.

Puis, une notion importante est celle de l'effet de ces fertilisations sur le rendement. Des mesures ont été prises tout au long de la croissance afin d'observer des différences de croissance et d'apparition de l'inflorescence selon l'administration des fertilisants. Cependant, comme mentionné précédemment, les plants ont été transplantés en tant qu'individus avec parfois un, deux ou trois cœurs, de manière aléatoire. De plus, ceux-ci n'ont pas été élevés sur place, et leurs conditions de vie jusque là sont inconnues. Le terme individu pour chaque pot panier n'est donc pas adapté, il n'est pas possible de comparer réellement les "plants" entre eux. Ce qu'on souhaite évaluer concerne la production fruitière, afin de connaître les défis d'un

passage en fertilisation organique. Ainsi, sont évalués la masse fraîche moyenne des fruits au total, et la fréquence d'apparition des fruits pour chaque modalité. Le manque de matériels de mesure n'a pas permis l'évaluation des critères de références en matière de qualité (%Brix, acidité titrable...).

- Les analyses organoleptiques

Eurofins a été contacté afin d'évaluer certains critères physiologiques. Le budget alloué a été limitant pour la sélection des tests à réaliser. Ainsi, ont été sélectionnés des tests de profil des sucres, des fibres alimentaires, et les concentrations en éléments fondamentaux, azote, phosphore et potassium. Le but est d'évaluer des critères qui seraient les plus représentatifs des effets des différentes fertilisations sur l'assimilation des nutriments par les plantes, et finalement leurs effets sur les critères organoleptiques du produit commercialisé: les fraises.

- Les analyses sensorielles

Finalement, dans la commercialisation des fraises, un élément primordial est celui de l'appréciation des consommateurs. Il est donc intéressant d'évaluer des potentielles différences des qualités sensorielles entre les fraises issues des différentes modalités. Ainsi, une évaluation sensorielle à l'aveugle a été réalisée au sein de l'équipe. Les participants n'étaient pas formés à l'évaluation sensorielle bien que tous soient concernés par une formation et une profession touchant à l'agriculture. Les fraises testées sont issues de la toute première récolte, datant du matin même. Chacun des participants avait à disposition deux fraises par modalité, une bien mûre et une à maturation. Ils ont dû répondre à un questionnaire Google Form, contenant trois parties d'évaluation avec différentes questions. L'aspect visuel, la fermeté et le parfum du fruit donnent une note pour l'aspect extérieur. La texture en bouche, le goût général, la sucrosité, la jutosité et l'acidité indiquent l'aspect intérieur. Puis, l'avis sur l'aspect général est demandé. Le nom des modalités n'était pas communiqué, dans le but d'une dégustation à l'aveugle, afin de ne pas biaiser les évaluations.

III. 2. 2. Expérience 2 sur les basilics

III. 2. 2. 1. Le matériel végétal

Les basilics de l'étude ont été semés sur place dans des supports de laine de roche adaptés pour la culture hydroponique, à raison de quatre graines par trou. Lors de la transplantation, 3 plants par trou ont été conservés, afin d'avoir le même nombre de plants au départ de l'étude. Les semences proviennent de chez Agrosemens, lot AS146916.

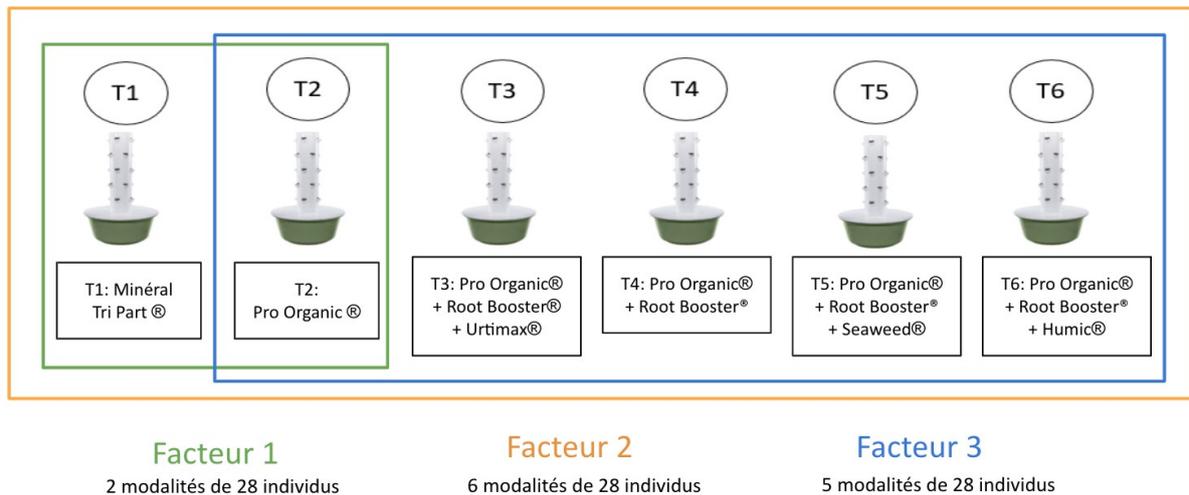


Figure 11. Présentation du dispositif expérimental n°2 pour des cultures de basilics sous différentes fertilisations (Claire Mouquet, 2022). *Comparaison de différents cocktails de fertilisation afin d'évaluer l'efficacité d'association de biostimulants de croissance avec une fertilisation organique sur une plante aromatique en aéroponie.*

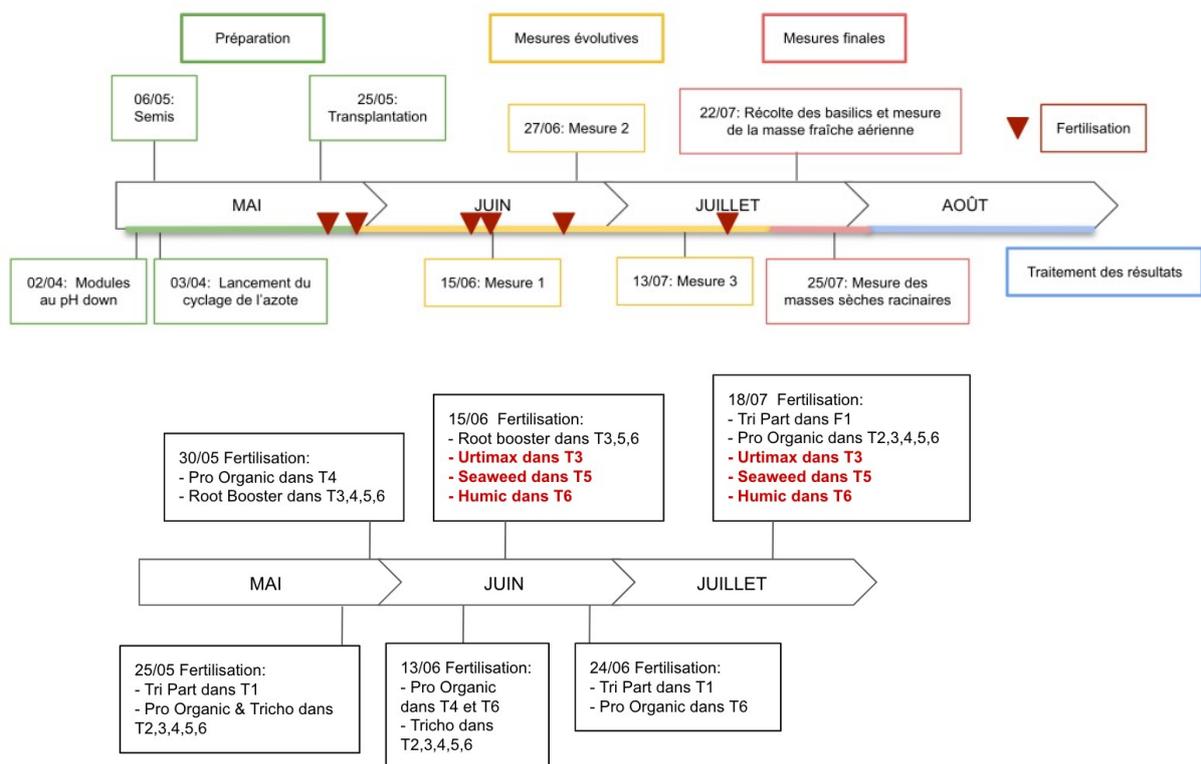


Figure 12. Frise chronologique des différentes étapes de l'expérience 2 effectuée sur les basilics. (Claire Mouquet, 2022)

III. 2. 2. 2. Les modalités testées:

Six modalités de 28 individus sont comparées, détaillées en Figure 11. Le Root Booster est testé seul afin d'évaluer son effet, puis en association avec différents biostimulants. Il a été choisi de tester Urtimax, Seaweed et Humic pour leurs actions préconisées différentes.

Trois facteurs furent évalués:

- Facteur 1: Quelle différence d'efficacité entre organique et minéral?
- Facteur 2: Quel est le cocktail le plus efficace?
- Facteur 3: Quel est le biostimulant le plus efficace?

III. 2. 2. 3. Suivi de l'expérience (Figure 12)

Des basilics ont été semés le 25 avril, cependant une attaque d'oiseaux a rendu impossible la croissance correcte des plants. D'autres semis ont été réalisés le 5 mai, puis protégés des attaques. Les tours ont été montées le 5 mai, et elles ont tourné au pH down pendant 24h. La nitrification de l'azote des tours pour les modalités organiques (T2, T3, T4, T5 et T6) fut lancé le 6 mai, avec ajout de 25 mL de Pro Orgarnic® et 6 g de Trichoderma. La fertilisation fut régulière en réponse aux besoins des plantes, selon les valeurs d'EC indiquées par l'électroconductimètre. Les biostimulants ont été ajoutés le 15/06, avec Urtimax dans T3 plutôt que dans T4 (comme c'était prévu à la base, dans la continuité des numéros), car la croissance de T4 avait déjà bien démarré contrairement à celle de T3.

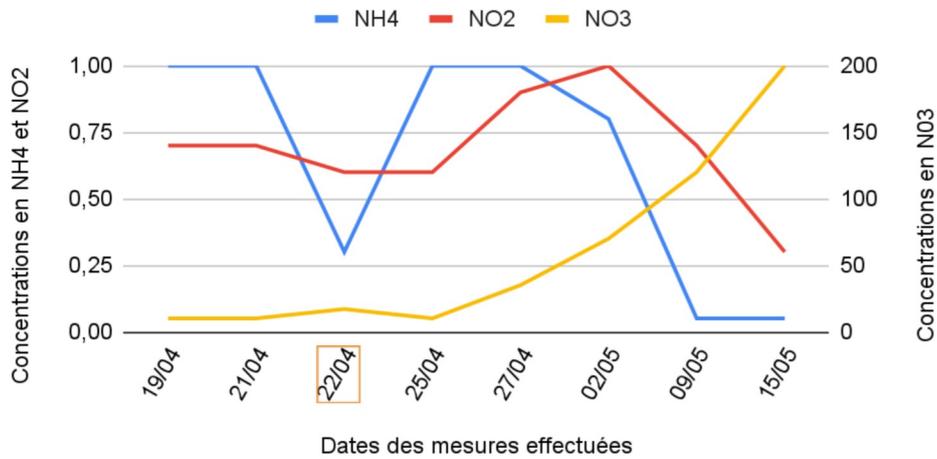
III. 2. 2. 4. Les mesures effectuées

Pour les basilics, seules des analyses phénotypiques ont été réalisées. En effet, en raison d'un manque de budget, il n'était pas possible d'effectuer les analyses sensorielles par Eurofins. De plus, en raison de problèmes de croissance pour certaines modalités, des dégustations sensorielles ne pouvaient être réalisées pour chaque modalité. Ainsi, la croissance des basilics fut évaluée en comparant leurs croissances en hauteur végétative. Trois mesures furent réalisées, les 15/06, 27/06 et 13/07. Puis, à la fin de l'expérience, la masse fraîche végétative ainsi que la masse sèche racinaire ont été évaluées et comparées, divisée par le nombre de plants car celui-ci n'était plus le même pour toutes les modalités, suite à l'attaque des oiseaux.

III. 4. Analyses statistiques

Une partie des données a été analysée statistiquement et graphiquement à l'aide du logiciel RStudio. On cherche à comparer des moyennes de différents groupes, dans le but de démontrer, ou non, une différence entre eux. Pour toutes les analyses, le même procédé est respecté. Des tests de boxplots sont tout d'abord effectués afin d'évaluer la présence éventuelle de valeurs aberrantes. Puis, la normalité des données est contrôlée à l'air d'un test de Kolmogorov-Smirnoff. Si celle-ci est validée, un test paramétrique est applicable et une anova

a) Évolution des concentrations des différentes formes de l'azote en mg/litre - F2



b) Évolution des concentrations des différentes formes de l'azote en mg/litre - F3

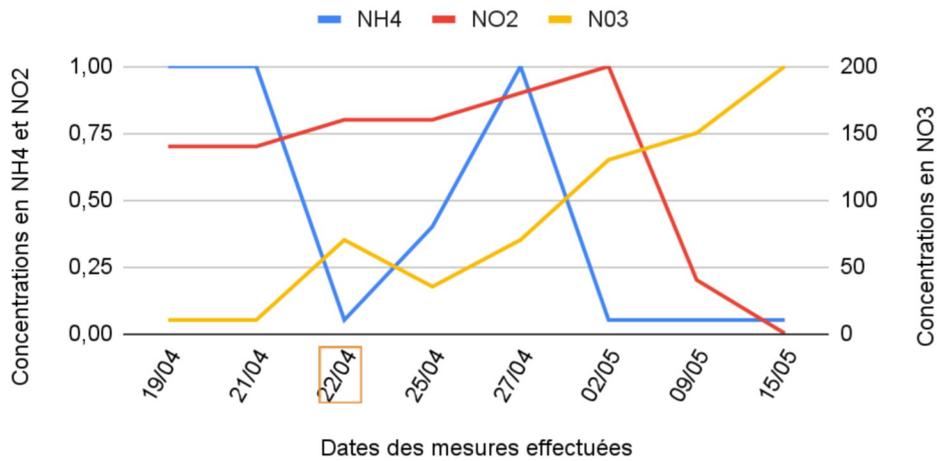


Figure 13. Courbes représentant l'évolution de la nitrification de l'azote pour les deux modalités en organiques F2 et F3 entre le 19 avril et le 15 mai 2022. (Claire Mouquet, 2022)

a) Courbes de la nitrification de l'azote pour F2, b) Courbes de la nitrification de l'azote pour F3.

Carré orange: Date de transplantation des fraises dans les modules.

est alors réalisée. Dans le cas contraire, un test non paramétrique doit être effectué, et des tests de Kruskal Wallis sont alors effectués. Ce sont des tests d'analyse de variance, et dans tous les cas, la variable de groupement ou variable explicative est la modalité fertilisation.

III. 4. 1. Le cas des fraises

Pour l'analyse des reprises racinaires chez les fraises, le test de normalité donnant des p-values $> 0,05$, suggèrent l'utilisation d'un test non paramétrique. La variable explicative dans ce cas comporte trois groupes d'individus, F1, F2 et F3, induisant l'utilisation d'un test de Kruskal-Wallis pour chaque date.

Pour les analyses sensorielles, la normalité n'est pas respectée, un test ANOVA est alors réalisé pour chaque aspect évalué, en comparant les différentes modalités, émettant les hypothèses suivantes: H0: Il n'y a pas de différence significative entre les différentes fertilisations. H1: Il y a au moins un groupe qui est significativement différent.

III. 4. 2. Le cas des basilics

La comparaison des moyennes obtenues pour la hauteur des basilics à chaque date de mesure ne suit pas de loi normale. Ici, la variable explicative comporte six groupes d'individus à comparer: T1, T2, T3, T4, T5 et T6. Un test non paramétrique de Kruskal Wallis est donc réalisé.

IV. Résultats

IV. 1. Expérience 1, les fraises

IV. 1. 1. Suivi des solutions nutritives

Les mesures des concentrations des trois formes de l'azote dans la solution nous donnent des informations quant à l'avancée de la nitrification pour les deux modalités en organique F2 et F3 (Figure 13). Pour les deux modalités, on observe que la nitrification a été bien réalisée. En effet, aux dernières mesures (15/05), il n'y a plus de NH_4 , plus de NO_2 et le NO_3 est au plus haut. Il est important de notifier que les fraises ont été transplantées le 22 avril, à la suite de quoi dans les deux cas, la concentration de NH_4 est remontée, pour ensuite redescendre. Entre les deux, on observe une similarité des courbes. Des tendances se dégagent à l'observation. Selon les courbes, F3 atteint une nitrification complète avant F2, et semble être plus efficace au démarrage, avec une courbe de NO_2 et NO_3 qui augmentent plus vite au début.

Les mesures d'EC prélevées durant l'étude nous servent de référence pour connaître la concentration en minéraux des trois modalités (Figure 14). On observe ainsi une augmentation fluctuante des EC pour les trois modalités, en accord avec une augmentation des températures.

Évolution de l'EC pour les différentes modalités de fertilisations sur les cultures de fraises au cours du temps

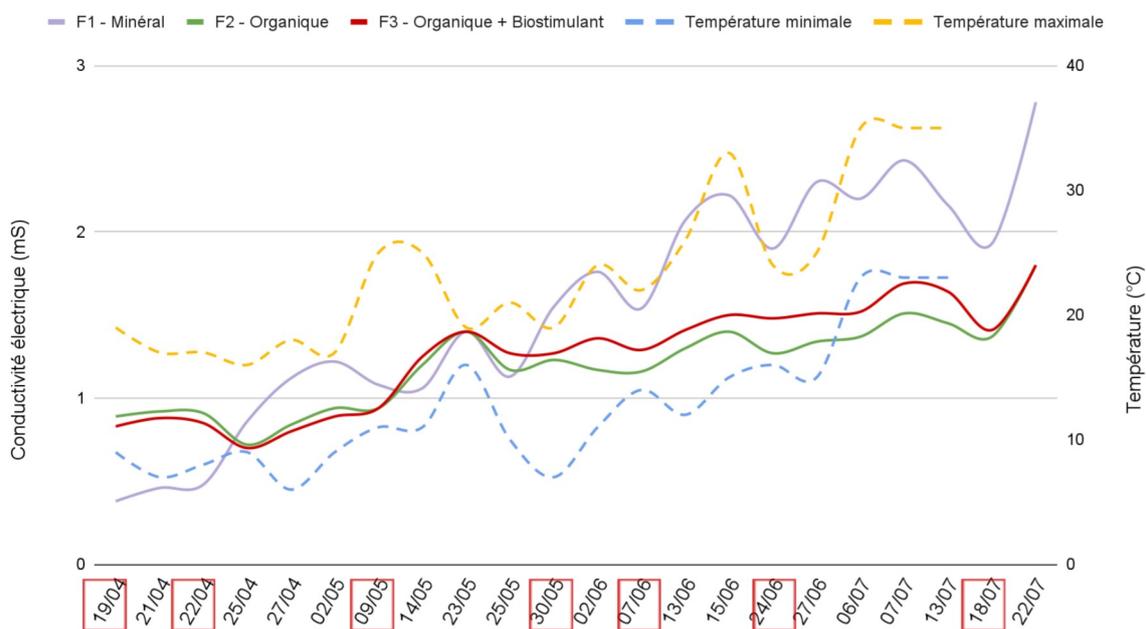


Figure 14. Courbes d'évolution des EC (mS) pour chaque modalité, avec une indication sur les températures ambiantes maximales et minimales (°C). (Claire Mouquet, 2022)

Carré rouge: Fertilisation.

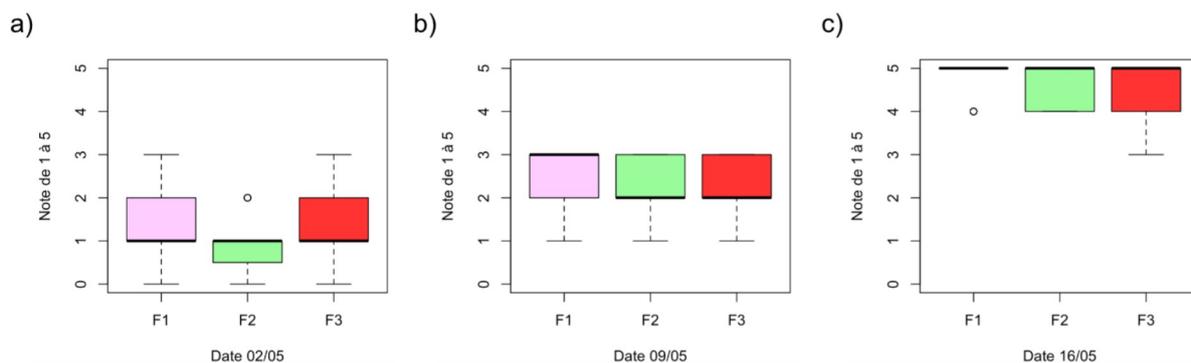


Figure 15. Boxplots obtenus pour la comparaison de la reprise racinaire selon chaque modalité à trois dates différentes. (Claire Mouquet, 2022)

a) boxplots pour la date 02_05, b) boxplots pour la date 09_05, c) boxplots pour la date 16_05.

La courbe F1 répond directement par une augmentation de l'EC suite à une fertilisation, confirmant l'effet direct de la fertilisation minérale, en arrivant au-dessus des 2 mS/cm pour la fructification (alentours de mi-juin). Les fertilisations en organiques sont plus aléatoires, et restent en dessous de celles de F1, autour de 1,5mS/cm. Entre F2 et F3, les EC sont globalement similaires, avec une légère meilleure EC pour F3 entre le 23/05 et le 18/07.

IV. 1. 2. Résultats phénotypiques

- La reprise racinaire

Les fraises ont tout d'abord fait état d'une observation de la reprise racinaire sur les trois premières mesures, les 02/05, 09/05 et 16/05, pour chaque plant de chaque modalité. On a pu comparer leur reprise racinaire à chacune des dates, à l'aide des boxplots obtenus via Rstudio pour observer les médianes et les valeurs aberrantes (figure 15) et d'un graphique en barre représentant visuellement la comparaison de ces moyennes et leurs écart-types (Figure 16). Les valeurs aberrantes observées sur le boxplot pour F2 le 02/05 et F1 le 16/05 souligne une variabilité de la reprise, avec certains plants ayant mieux démarrés que les autres pour F2, et d'autres prenant plus de temps par la suite pour F1. On observe donc des tendances, suggérant une meilleure reprise racinaire de F1 par rapport aux modalités en organique F2 et F3, et F3 semble être également meilleur que F2 à ce niveau. Finalement, les trois groupes arrivent à un score équivalent trois semaines après la transplantation. Le test statistique non paramétrique Kruskal Wallis réalisé pour chaque date donne une p-value afin de dire si les différentes moyennes obtenues à ces dates sont significativement différentes ou non. Pour 02/05, la comparaison des différentes valeurs de chaque modalité entre elles donne une p-value de $0.3974 > 0,05$. Pour 09/05, p-value = 0.2367. Et enfin pour 16/05, p-value = 0.579. Ainsi, la réalisation de tests non paramétriques de Kruskal-Wallis permet d'affirmer qu'aux trois dates évaluées, il n'y a pas de différence significative pour la reprise racinaire entre les différents groupes.

- Le rendement par modalité

Ensuite, il était intéressant de connaître le rendement par modalité. Pour cela, les fruits de chaque modalité ont été récoltés à différentes dates tout au long de l'étude, et leur poids total est divisé par le nombre de fruits récoltés, afin d'obtenir une moyenne de masse fraîche par fruit pour chaque modalité (Tableau II). Ici, on observe également les médianes, car les données sont très aléatoires, comme on le voit avec les écart-types qui sont très grands. Ces valeurs sont à titre indicatif, afin de comparer les trois groupes sur leur production. Ces valeurs ne peuvent pas faire état de tests statistiques car le détail de masse fraîche pour chaque fruit récolté n'est pas connu. Le tableau conclut sur une masse fraîche produite plus importante pour F2, autant avec la moyenne que la médiane obtenues. Puis, les moyennes indiquent une

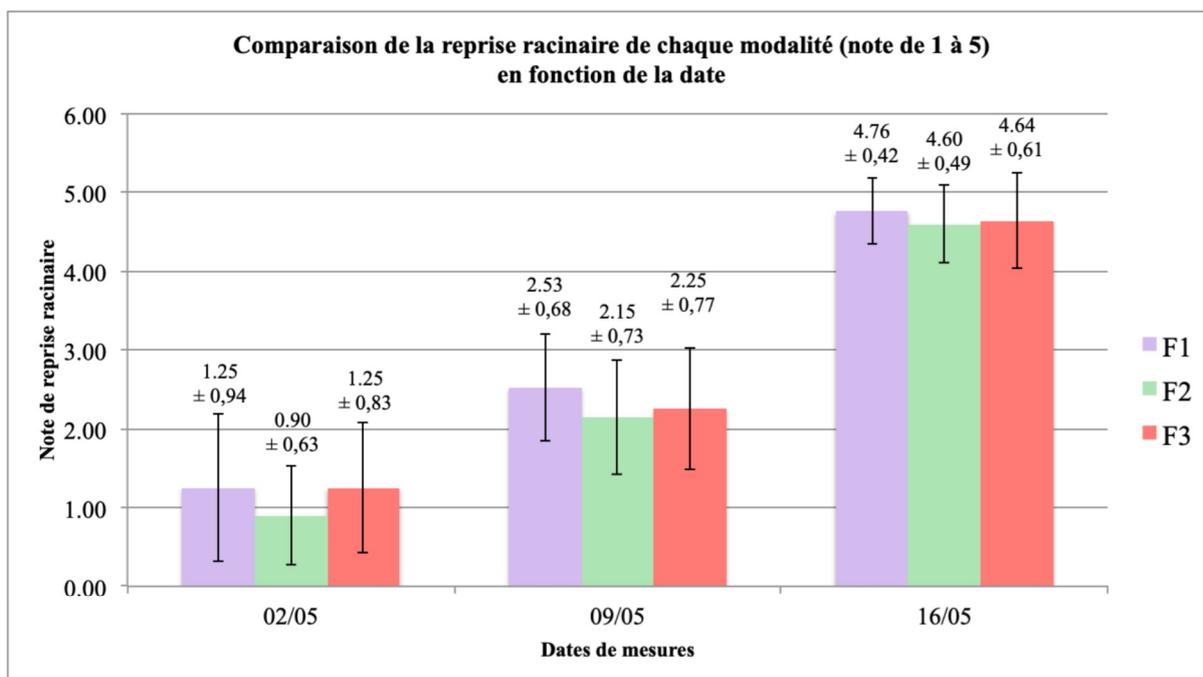


Figure 16. Graphique indiquant la reprise racinaire de trois groupes de plants de fraises soumis à une fertilisation différente, au cours de 3 dates après la transplantation. (Claire Mouquet, 2022)

Barème de notation: 1: premières nouvelles racines apparues, 2: plusieurs nouvelles racines, 3: reprise bien répandue, 4: reprise presque complète, 5: reprise des nouvelles racines terminée.

Tableau II. Moyennes et médianes de la masse fraîche par fruit pour chaque modalité de l'expérience 1. (Claire Mouquet, 2022)

	Masse fraîche d'un fruit de F1 (g)	Masse fraîche d'un fruit de F2 (g)	Masse fraîche d'un fruit de F3 (g)
Moyennes	6,96 ± 2,69	7,25 ± 3,31	7,10 ± 3,14
Médianes	6,31	6,85	5,82

meilleure production pour F3, tandis que les médianes indiquent l'inverse: une masse fraîche plus importante pour F2. Il est intéressant d'observer que les trois valeurs de masse fraîches sont rapprochées.

Les courbes d'évolution (Figure 17) affichent une régularité sur les masses fraîches obtenues par fruit entre les trois groupes aux fertilisations différentes tout au long de l'étude. Une corrélation avec la température est difficile à confirmer.

IV. 1. 3. Analyses organoleptiques

Pour cette partie, les données analysées sont celles fournies par Eurofins suite à l'envoi d'échantillons pour les trois modalités (Tableau III). Elles ne font pas état d'une analyse statistique car ces données sont fournies dans ces valeurs brutes par Eurofins. Pour ce qui est du saccharose, lactose et maltose, ils sont tous inférieurs à 0,02 g/mg. Il n'y a pas de différence importante entre les trois modalités au niveau des concentrations en glucose, alors qu'on observe une concentration légèrement supérieure en fructose, en sucres réducteurs et en fibres alimentaires pour les modalités en organique F2 et F3 (bien que les écart-types relativisent ces différences).

Pour ce qui est des éléments minéraux, les modalités en organiques F2 et F3 sont celles affichant les concentrations en nitrate les plus élevées, avec une supériorité pour F2. C'est l'inverse pour le nitrite, avec des concentrations plus élevées pour F1. Pour le phosphore, les concentrations sont également plus importantes en organique qu'en minéral, et pour le potassium, c'est cette fois-ci le minéral qui affiche une plus grande concentration, et dans les deux cas, F2 obtient les plus grandes valeurs. Cependant sur ces analyses élémentaires, les écart-types sont très importants, suggérant une grande variabilité des données.

IV. 1. 4. Analyses sensorielles

Pour cette partie, on compare les moyennes données par les participants pour chaque critère évalué, regroupés au final en trois catégories, aspect intérieur, aspect extérieur et aspect général (Tableau IV). Les tests statistiques nous ont permis d'observer des valeurs aberrantes lors de l'observation des boxplots (Figure 18). Cela rappelle la variation des goûts de chacun, représentatifs de l'évaluation gustative. Les valeurs aberrantes ont donc été conservées. La normalité étant respectée, le test ANOVA pour chaque catégorie permet d'obtenir des p-values pour déterminer une différence significative ou non. Les valeurs de p-value pour chaque critère sont respectivement 0.172, 0.306 et 0.184, permettant de valider l'hypothèse H0. On peut dire qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes évalués, pour chacun des critères. La réalisation d'un graphique en barre (Figure 19), permet de dégager tout de même des tendances comme cela a été notifié par les participants lors de la dégustation. Il est intéressant de remarquer que toutes les fraises obtiennent des notes moyennes au-dessus de 3,5. F2

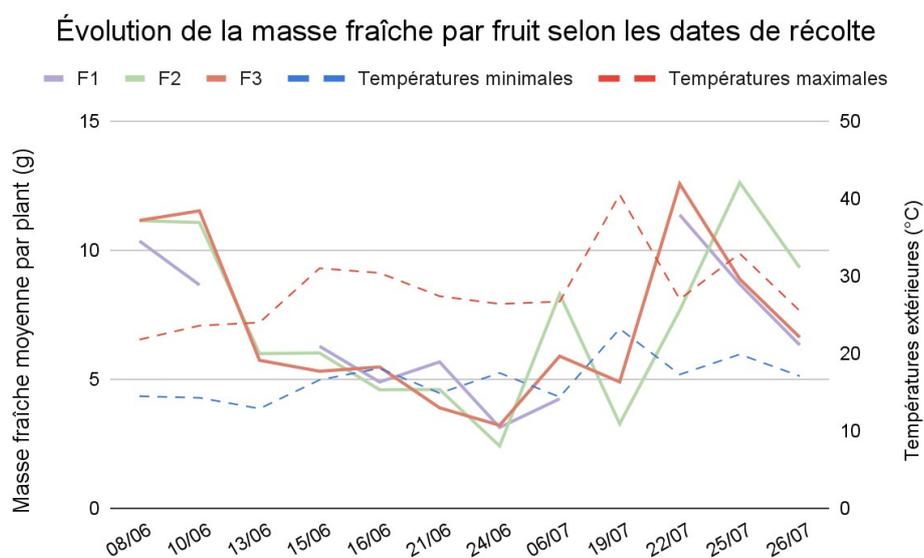


Figure 17. Courbes d'évolution de la masse fraîche moyenne obtenue par fruit selon les dates de récolte au long de l'étude. (Claire Mouquet, 2022)

Tableau III. Analyses organoleptiques fournies par Eurofins pour chaque modalité de l'expérience 1. (Eurofins, 2022)

a) Concentrations d'éléments de la composition nutritionnelle, profil des sucres et fibres alimentaires,
 b) Concentrations d'éléments minéraux principaux.

a)	Profil des Sucres (g/100g)						Fibres alimentaires totales (g/100g)
	Glucose	Fructose	Saccharose	Lactose	Maltose	Sucres Reducteurs	
F1	4,2±1,2	4,7±1,2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	9.0 (± 2.0)	1,1±0,8
F2	4.3 (± 1.2)	5.1 (± 1.1)	< 0.2	< 0.2	< 0.2	9.3 (± 2.0)	1.8 (± 1.0)
F3	4.2 (± 1.2)	5.1 (± 1.1)	< 0.2	< 0.2	< 0.2	9.3 (± 2.0)	1.7 (± 1.0)

semble être la plus régulière. F1 semble avoir le plus bel aspect, avec un goût moindre, et F3 tend vers l'inverse. Selon les commentaires récoltés lors de la dégustation, le goût sucré est prépondérant chez les fraises en fertilisation organique, F2 et F3, et un goût plus acide est retrouvé chez F1.

IV. 2. Expérience 2, les basilics

IV. 2. 1. Suivi des solutions nutritives

Le suivi des basilics n'a pas pu faire état d'un suivi de la nitrification de l'azote. En effet, les détecteurs d'azote ont été en rupture de stock. Les EC pour chacune des modalités ont été prélevées tout au long de l'étude (Figure 20). T2, T3, et T5 affichent une certaine continuité de leurs EC dépassant les 1,2 mS/cm, avec une baisse à 0,8 mS/cm pour T2 au 06/07. T1 affiche des EC très élevées autour du 13/06, T4 un démarrage difficile jusqu'à atteindre les 1,3 mS/cm autour du 15/06 et T6 se trouve être en dessous des 1mS/cm à partir du 13/06. À l'exception de T6, on observe une augmentation graduelle, en accord avec les augmentations de température.

IV. 2. 2. Suivi de la croissance (hauteur)

La hauteur de chaque plant mesurée pour chaque modalité à différentes dates donne une indication sur l'évolution de la croissance des basilics sous différentes fertilisations (Tableau V). Un test de boxplot (Figure 21) a permis de mettre en évidence des valeurs aberrantes lors des deux premières dates, soulignant un démarrage irrégulier de la croissance. Celles-ci ont été conservées, faisant partie de l'évaluation. Une comparaison des moyennes avec les médianes permet de confirmer la pertinence d'utilisation des moyennes pour comparer les modalités entre elles. Pour chaque date 02/06, 15/06 et 27/06, les p-values obtenues avec le test de Kruskal Wallis sont inférieures à $2.2e-16$, validant l'hypothèse de différence significative entre les groupes comparés. En revanche, cela indique qu'il y a une différence significative, sans préciser laquelle. Parmi les modalités, T2, T3 et T5 n'ont presque pas grandi, ne dépassant pas les 4 cm de hauteur (Figure 22). Ces modalités correspondent respectivement à celle en fertilisation organique simple, celle en fertilisation organique avec Root Booster® et biostimulant Urtimax®, ainsi que celle en fertilisation organique, Root Booster® et Seaweed®. Dans cette expérience, ces cocktails de fertilisation n'ont pas démontré leur efficacité. Tandis que T1, T4 et T6 ont atteint des moyennes autour des 19 cm avant de monter en graine. Celles-ci correspondent respectivement aux modalités de fertilisation minérale, organique simple et organique avec Root Booster® et Humic®. Dans cette expérience, ces trois cocktails de fertilisation ont démontré leur efficacité. La fertilisation minérale a connu une croissance régulière. La pompe de T4 s'est vidée en cours de route et la fertilisation a dû être refaite, cependant cela n'a pas altéré la croissance des basilics, donnant tout de même des résultats moins importants que T1. T6 a connu un démarrage difficile, puis termine avec les hauteurs les

b)	Profil des nitrites (mg/kg)				Analyses élémentaires (mg/kg)	
	Nitrates	NaNO ₃	NaNO ₂	Nitrites	Phosphore	Potassium
F1	49,1±10,9	67,3±14,9	< 9.0	< 6.0	170 (± 51)	2020 (± 606)
F2	88.1 (± 8.0)	120.7 (± 11.0)	<0.5	<1	226 (± 68)	2000 (± 600)
F3	63.0 (± 6.0)	86.4 (± 8.3)	<0.5	<1	196 (± 59)	1970 (± 591)

Tableau IV. Moyennes de notation obtenues pour chacun des critères évalués lors de la dégustation sensorielle de fraises. (Claire Mouquet, 2022)

a) Tableau présentant les sous-catégories des aspects évalués et leurs moyennes obtenues.

b) Tableau des moyennes pour les aspects finaux groupés.

a)

	Aspect extérieur			Aspect gustatif					Aspect général
	Aspect visuel & Couleur	Fermeté & du fruit	Odeur, parfum au nez	Texture en bouche	Goût général	Sucrosité	Jutosité	Acidité	
F1	4,45	4,55	3,82	3,91	4,18	3,73	3,73	3,55	3,64
F2	4,27	4,27	2,91	4	4,36	4,09	4,09	3,45	4,18
F3	4,18	4,55	3,45	4,09	4,45	4,09	4	3,55	4

b)

	Aspect extérieur	Aspect gustatif	Aspect général
F1	4,27±0,32	3,82±0,21	3,64±0,77
F2	3,82±0,64	4±0,3	4,18±0,57
F3	4,06±0,46	4,04±0,29	4±0,6

plus importantes. Après un ajout du biostimulant Humic®, la croissance s'est améliorée. Cette analyse phénotypique ne peut pas faire état de réelles conclusions. En effet, dans cette expérience, les basilics de tours entières n'ont pas du tout dépassé le stade 2 nœuds, laissant suspecter un autre facteur responsable de ce problème de croissance.

IV. 2. 2. Masses fraîches aériennes et masses sèches racinaires

Finalement, au moment de la récolte, les masses fraîches aériennes totales ainsi que les masses racinaires totales furent pesées pour chaque modalité et divisées par le nombre de plants (Tableau VI). On retrouve bien les différences de croissance observées dans la partie précédente. Les plants de T2 sont morts peu avant la récolte, d'un manque d'irrigation suite à un problème de pompe. T3 et T5 ne se sont pas développés. Ces trois modalités ne font pas état de comparaison. On découvre que c'est T6, modalité en fertilisation organique Pro Organic® avec biostimulant racinaire Root Booster® et de croissance Humic® qui a produit le plus de matière fraîche aérienne avec 11,51 g par plant. Puis c'est T1, modalité en fertilisation minérale Tri Part® avec 10,32 g, et enfin T4, modalité en fertilisation organique Pro Organic® et biostimulant racinaire Roots booster®, avec 8,84 g. Pour les masses sèches racinaires, T6 reste en tête avec 6,48 g par plant, et cette fois c'est T4 en deuxième avec 3,97 g puis T1 avec 2,14 g.

V. Discussion

V.1. Le suivi des cultures

La nitrification de l'azote est une étape primordiale de la croissance des plants lors d'une fertilisation organique. Pour les fraises, celui-ci a été bien réalisé pour les deux modalités en organiques. Il est intéressant de rappeler que les deux fertilisations sont les mêmes jusqu'à l'ajout du Root Booster® le 25/04 dans F3. Les plants ayant été répartis au hasard lors de la transplantation, il est possible que certains furent plus gourmands que d'autres en nutriments, intervenant dans le processus de nitrification. Pour les basilics, la nitrification de l'azote ne fut pas aussi bien contrôlée, et cela pourrait être une possibilité d'explication du retard de croissance des modalités T2, T3 et T5. Il aurait été intéressant de connaître leurs concentrations en formes d'azote afin de savoir si cela a interféré dans leur développement.

L'observation des EC a permis de contrôler l'évolution des solutions nutritives, cependant des biais à ce niveau peuvent être mentionnés: L'outil utilisé pour les mesures n'est pas de grande précision scientifique, et les températures extérieures et de l'eau, comme l'horaire de la mesure peuvent interférer avec la valeur d'EC affichée. Les EC des fraises ont atteint des valeurs satisfaisantes. Pour les basilics, celles-ci sont plus variables, à l'image des résultats.

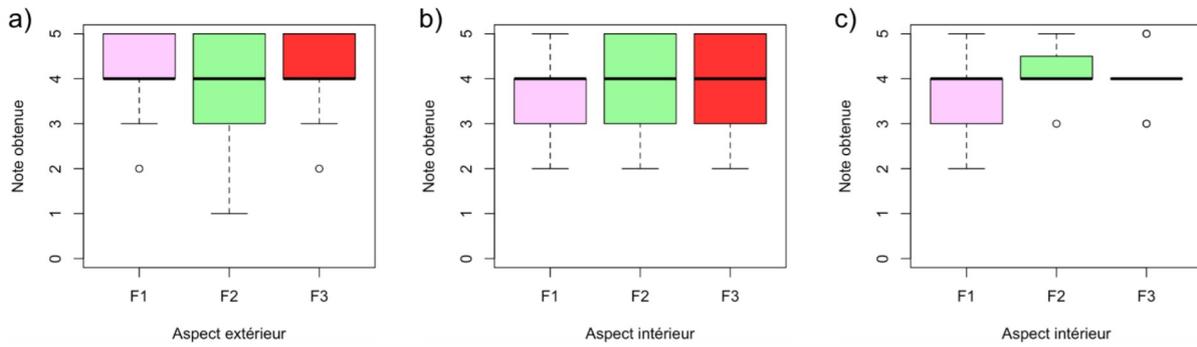


Figure 18. Boxplots obtenus pour la comparaison des notes des trois modalités pour chaque critère évalué dans la dégustation sensorielle. (Claire Mouquet, 2022)

a) boxplots pour le critère “aspect extérieur”, b) boxplots pour le critère “aspect intérieur”, c) boxplots pour le critère “aspect général”.

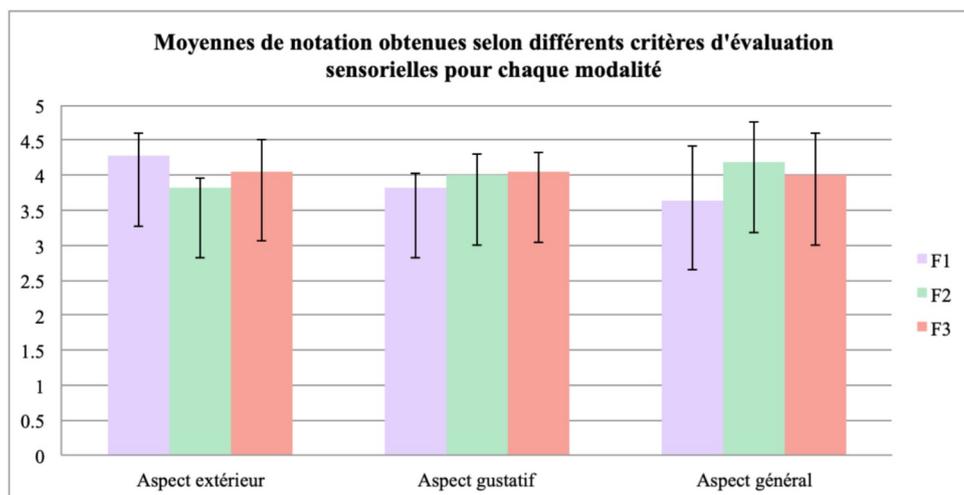


Figure 19. Représentation graphique des moyennes de notation obtenues selon différents critères d'évaluation sensorielles pour chaque modalité de fertilisation différentes. (Claire Mouquet, 2022)

Finalement, le pH est une notion qui fut difficile à appréhender, et qui l'est aujourd'hui encore sur les nombreuses fermes de Cueillette Urbaine. La limite à 7,5 n'est pas respectée. Le pH à 8,5 a pu interférer avec les problèmes de croissance, qui ont été retrouvés dans l'expérimentation: carences, défauts de croissance. À un pH élevé, le phosphore interagit avec le calcium (Figure 4) et n'est alors plus disponible. Le pH de la solution modifie certainement le comportement des éléments des solutions. Mais il était intéressant de reproduire exactement le système présent sur les fermes de l'entreprise afin d'en comprendre le réel fonctionnement, afin de proposer des solutions adaptées. L'ajout de solution tampon dans les cuves d'approvisionnement pourrait alors être une option et cela mériterait des tests supplémentaires.

V. 2. Les fraises

Cette étude a donc permis de mettre en évidence l'efficacité du fertilisant Pro Organic® de chez Terra Aquatica sur des cultures de fraises dans l'entreprise Cueillette Urbaine, tant au niveau de la reprise racinaire, donc de la résistance à la transplantation, qu'au rendement final, et l'ajout de biostimulants ne semble pas faire grande différence, du moins pas significative. De plus, la variations des masses fraîches récoltées le long de l'étude sont également similaires, variant sans grandes différences entre les modalités, mais semblant suivre les variations de température. Comme mentionné dans les résultats, ce ne sont que des observations, et il aurait été intéressant de pouvoir réaliser des tests significatifs. La dégustation sensorielle ne permet pas non plus de dégager des différences significatives. Ce genre de tests est sujet aux aléas des goûts de chacun, mais également à l'éventualité qu'une fraise du lot ait un goût différent. C'est ce que peuvent retranscrire les valeurs aberrantes que l'on retrouve dans les boxplots.

La modalité F2 en fertilisation organique Pro Organic® est donc celle qui obtient les meilleures notes en termes de rendement, et de dégustation sensorielle. Bien que les différences ne soient pas significatives, F3 affiche les résultats les moins bons, et cela interroge sur l'effet des biostimulants. Leur influence est peut-être ailleurs. La reprise racinaire par exemple, est cette fois-ci meilleure pour F3, pouvant témoigner de l'action du stimulant racinaire Root Booster®. Dans un article de Parađiković *et al.*, (2018), des expériences de fertilisation organique sur des fraises donnent des effets très variables selon les biostimulants appliqués. Bien que l'étude dégage une tendance significative à l'amélioration générale des conditions de croissance des plants en présence de biostimulants, plus particulièrement en situation de stress, les auteurs insistent sur le peu de connaissances dans la littérature actuelle sur le fonctionnement qui a lieu derrière ces améliorations. Cela rend l'application de ces biostimulants assez hasardeuse et il serait intéressant de connaître les relations spécifiques entre les composants du produit appliqué et les réactions chimiques et métaboliques répondantes dans la plante. Pour cela, il aurait été pertinent de connaître la composition exacte des biostimulants Root Booster et Bloom

Évolution de l'EC pour les différentes modalités de fertilisations sur les cultures de fraises au cours du temps

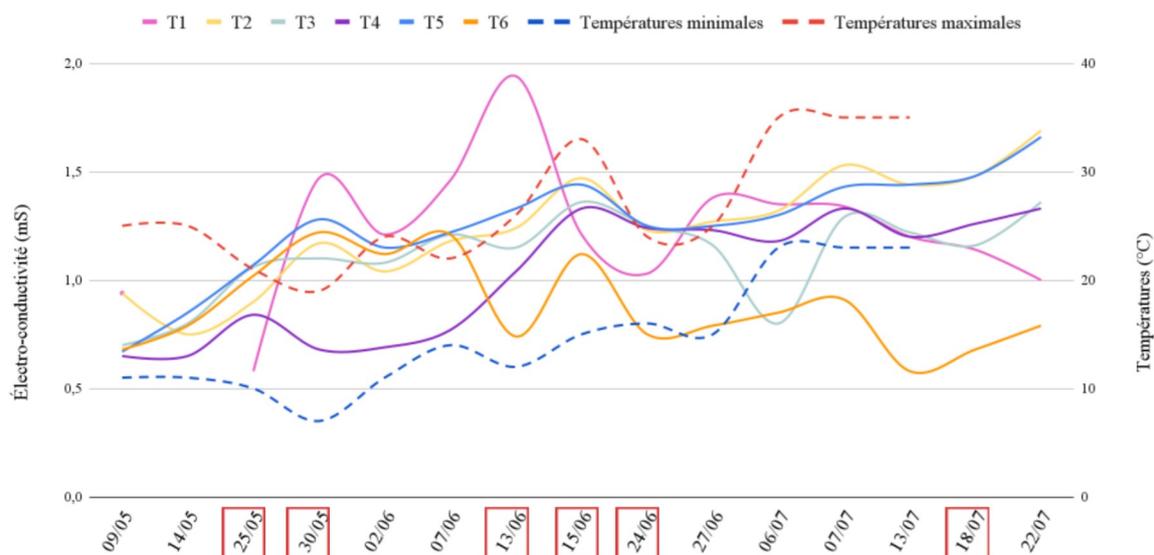


Figure 20. Courbes d'évolution des EC (mS/cm) pour chaque modalité au long de l'expérience sur les basilics, avec une indication sur les températures ambiantes maximales et minimales (°C). (Claire Mouquet, 2022)

Carré rouge = fertilisation.

Tableau V. Moyennes des hauteurs (cm) des plants de basilic à différentes dates le long de l'étude. (Claire Mouquet, 2022)

	Moyennes des hauteurs des plants de basilics (cm)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
15/06	2,6±0,3	2,1±0,4	1,2±0,5	3,9±0,5	2,2±0,6	2,9±0,5
27/06	8,2±2,8	2,7±1	2,4±0,9	7,2±0,6	2,2±0,9	6,1±2,1
13/07	18,4±5,9	3,2±0,6	2,6±0,6	17,1±2,2	2,4±0,9	21,6±5,2

Booster. De plus, il serait intéressant de tester une modalité avec uniquement l'application de biostimulant racinaire, pour dégager les effets des deux produits distinctement.

Il est intéressant de mettre en relation les résultats des différentes analyses, notamment en essayant d'interpréter les valeurs obtenues pour les analyses organoleptiques. Bien que limitées, ce sont des bonnes indications sur le métabolisme interne du développement des fruits, et ainsi potentiellement l'absorption des nutriments par les plants. La formation des fruits puise ses réserves en tant qu'organe puits auprès des organes sources tels que les racines, via le flux phloémique (Simier, 2020). Le phloème a une implication majeure dans la nutrition organique et minérale des organes puits. Il est très riche en glucides solubles (saccharose, polyalcools, oligo-saccharides), en acides aminés, en hormones, et certains minéraux, mais pauvre en nitrates (Simier, 2020). L'apport de formes azotées se fait par les autres molécules. L'évaluation des teneurs en formes azotées comme réalisée dans les analyses organoleptiques ne sont peut être pas pertinentes ici. En effet, la question se pose alors du lien entre ces valeurs et le niveau d'assimilation des nitrates au niveau des racines. Pour une meilleure analyse, il aurait été intéressant d'effectuer ces tests directement au niveau des racines. Ici, cela nous indique seulement la composition nutritionnelle des fruits, sans pour autant représenter une relation de cause à effet avec l'assimilation des minéraux.

Les résultats suscitent tout de même des commentaires. Les valeurs obtenues pour les profils de nitrites sont intrigantes. En effet, les modalités en organique F2 et F3 affichent des valeurs pour les nitrates plus élevées que la modalité en minéral, et des valeurs pour les nitrites plus faibles, en comparaison avec les valeurs obtenues en minéral. Il est difficile de trouver des articles qui mettent en relation l'assimilation des nitrates au niveau racinaire, et leur présence dans les fruits. Lors du choix des analyses organoleptiques à effectuer, une volonté était de contrôler la présence de nitrates et nitrites dans les fruits, afin de déduire la capacité d'assimilation de ceux-ci par les racines. C'était faire de gros raccourcis, et il s'avère que ces procédés sont multifactoriels, et qu'en réalité les nitrates et nitrites ne sont pas réellement sous cette forme analysée dans les fruits (Krapp, 2015). Une question se pose alors sur les valeurs fournies par Eurofins. Cela représente certainement les formes d'azote retrouvées dans le fruit. On peut simplement conclure sur la présence plus importante de forme NO₃ et moindre de NO₂ dans les fraises sous une fertilisation organique, par rapport à une fertilisation minérale. La cause et l'explication de ce phénomène n'ont pas été trouvées ici. Davantage de recherches dans la littérature et un échange avec les manipulateurs d'Eurofins serait intéressant. Pour ce qui est du potassium, son rôle est bien connu dans le processus de formation des fruits, en tant que transporteur de l'eau et des nutriments vers les organes puits (Zerbino, 2018). Ici, les valeurs obtenues en concentration de potassium dans les fruits est moins importante pour les modalités en organique. Mais la significativité de cette différence est à questionner, au vu des

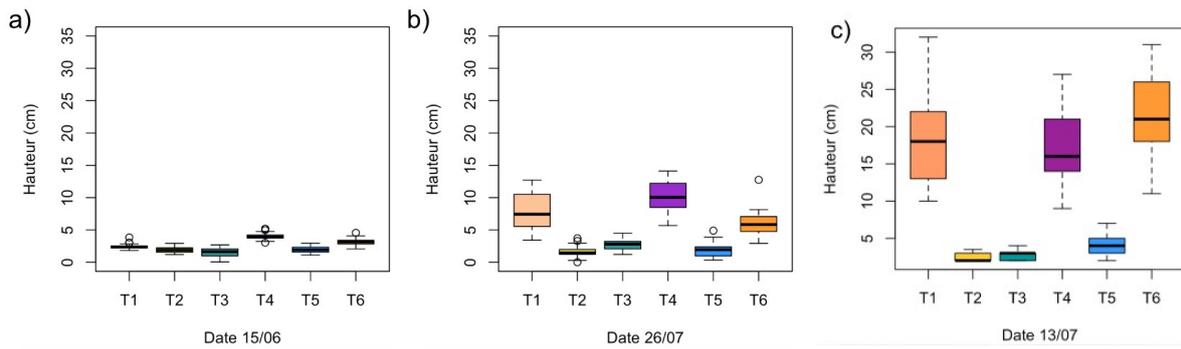


Figure 21. Boxplots obtenus pour la comparaison des hauteurs des plants de basilics observées à trois dates différentes. (Claire Mouquet, 2022)

a) boxplots pour la date 15/06, b) boxplots pour la date 27/06, c) boxplots pour la date 13/07.

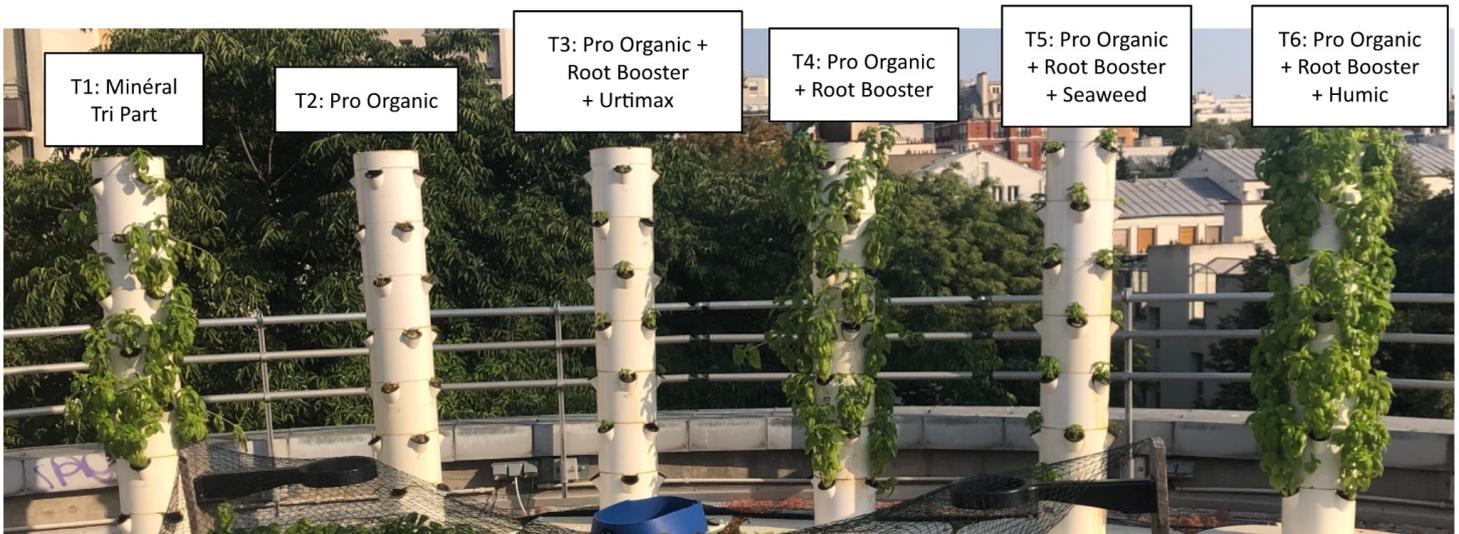


Figure 22. Photographie des différentes modalités quelques jours avant la récolte, zone d'expérimentation de l'Arche Végétale, Paris 12. (Claire Mouquet, 2022)

grands écart-types. Comme mentionné dans la synthèse bibliographique, le potassium est lié à la présence des sucres dans les fruits. Or ici, les sucres évalués ne sont pas inférieurs pour les modalités en organique. Puis, le phosphore occupe également une place importante dans les fruits, avec la constitution des acides nucléiques et les processus énergétiques (Zerbino, 2018), et est cette fois-ci plus important pour les organiques (avec de larges écart-types). Un dernier élément, le calcium, revient souvent dans la littérature concernant la formation des fruits chez le fraisier, qui n'a pas fait ici état d'analyse, et cela aurait pu être intéressant à observer.

Finalement, ces analyses ont permis de mettre en évidence des différences d'assimilation et de gestion des nutriments dans la formation des fruits chez le fraisier soumis à une fertilisation organique par rapport à une fertilisation minérale. Les causes de ces différences sont encore floues, et celles-ci mériteraient des recherches plus approfondies.

Dans la littérature, il n'est pas rare de se voir rappeler que les variations observées au niveau de la qualité nutritionnelle chez la fraise sont multifactorielles (Philippe, 2016). Et il est alors nécessaire de rappeler que dans cette étude, les plants ont été transplantés à l'âge adulte, ayant tous grandi jusque là dans les mêmes conditions. Afin d'interpréter plus précisément certains résultats, il aurait été pertinent d'obtenir les informations sur les conditions de culture des plants jusque là. En effet, une étude de Zerbino Léa (2018) mentionne bien l'influence des heures de froid, ou d'exposition à des flashes lumineux dans la production des plants sur leur développement. De plus, il y a également les conditions des plants lors de l'expérimentation qui ont pu être aléatoires, car à l'air libre. L'attaque des oiseaux ayant supprimé 7 plants à F3 et 4 plants à F1 a pu créer un stress chez les plants restants des modalités. La présence de pots paniers vides a également pu interférer avec la composition de la solution nutritive, avec l'entrée de lumière ou des billes d'argile tombées dedans. Il y a également le facteur des températures extérieures qui furent particulièrement élevées cet été sur Paris, avec plusieurs vagues de canicules. Cela peut impliquer un réchauffement des cultures, et une des conséquences peut être une surcroissance des racines, et par là une diminution du rendement (Zerbino, 2018).

V. 3. Les basilics

Les résultats obtenus pour cette expérience sur les basilics sont difficiles à analyser. En effet, il y a eu de grosses différences de croissance entre certaines modalités. Les rendements ont été satisfaisants comme attendu pour la modalité T1 en fertilisation minérale Tri Part®. T4, la fertilisation en Pro Organic® et Root Booster® bien qu'étant faiblement inférieure à T1 en masse aérienne, affiche une masse racinaire plus importante, suggérant un effet attendu du biostimulant Root Booster®. T6, en Pro Organic®, Root Booster® et Humic® a démontré une efficacité légèrement supérieure qu'en minéral, en masse aérienne et racinaire, au-delà des

15/06/2022

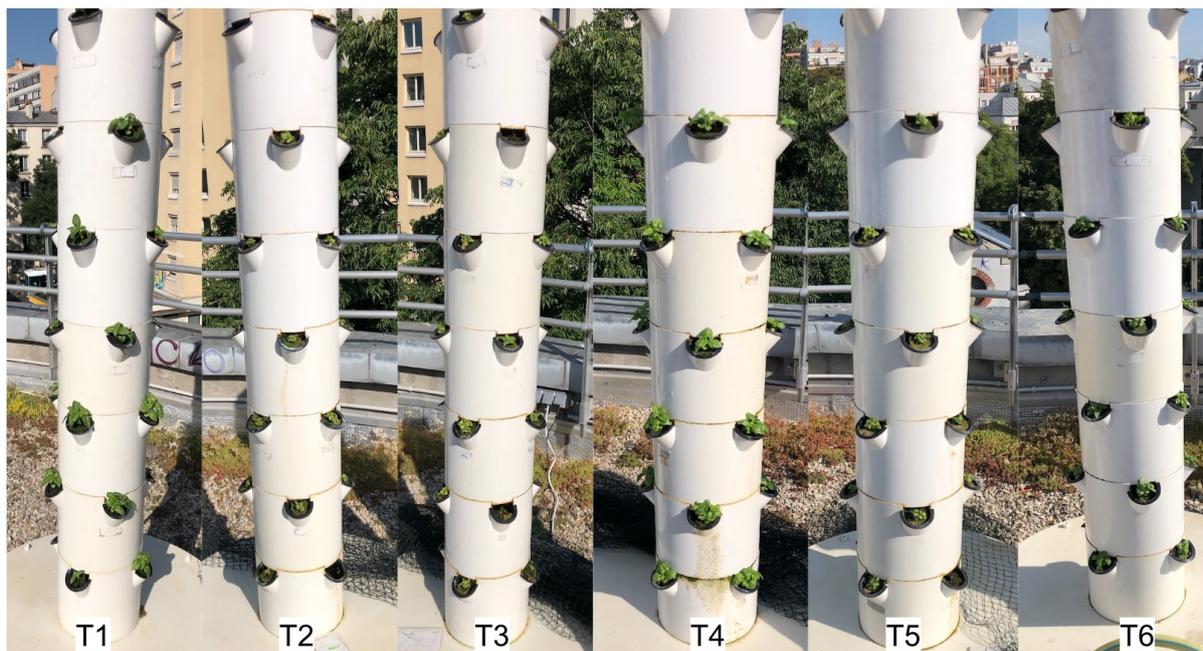


Figure 23. Photographie des différentes modalités de l'expérience des basilics au 15/06 sur l'Arche Végétale, Paris 12. (Claire Mouquet, 2022)

Tableau VI. Moyennes des masses fraîches aériennes et des masses sèches racinaires par plant pour chacune des modalités à la récolte des basilics. (Claire Mouquet, 2022)

	Masse fraîche aérienne moyenne par plant (g)	Masse sèche racinaire moyenne par plant (g)
T1	10,32	2,14
T2	x	x
T3	0,57	0,02
T4	8,84	3,97
T5	0,94	0,05
T6	11,51	6,48

attentes de l'étude. Cela peut être interprété comme un effet additionnel de Root Booster® et Humic®. À l'inverse, les modalités T2 en Pro Organic®, T3 en Pro Organic®, Root Booster® et Urtimax®, et T5 en Pro Organic®, Root Booster® et Seaweed® ont affiché une croissance presque nulle, restant au même stade de deux feuilles jusqu'à la fin de l'étude. La question se pose quant à une efficacité mauvaise des cocktails utilisés, ou l'entrée en jeu d'un facteur limitant non identifié. Une hypothèse pourrait être de dire que Humic® est plus efficace que les deux autres, cependant l'état des plants au 15/06, date d'ajout des biostimulants, remet en cause cette hypothèse. Les modalités T4 et T6 affichent déjà des plants en meilleure santé. Il semblerait que leur meilleur état soit déjà déterminé, cependant les biostimulants ont tout de même pu influencer sur la croissance, notamment pour T6. Dans l'étude d'Axelle Bethancourt effectuée l'année précédente sur des salades avait démontré également de meilleurs rendements obtenus avec le biostimulant Humic. En comparant tout de même les notices des trois biostimulants testés, (Annexe IV), Urtimax et Seaweed sont respectivement des extraits de purin d'ortie et d'algues et Humic comporte des acides humiques brutes. La composition et l'action décrites de Humic présuppose à une efficacité précise pour une meilleure croissance. Le fait qu'il apporte de l'oxyde de potassium, avec un pH 8 peuvent suggérer un indice sur sa meilleure efficacité dans l'eau de Paris à pH 8,5. Seaweed semble être plutôt destiné pour la floraison, et Urtimax pour la gestion de stress.

Une analyse organoleptique aurait pu permettre de mettre en évidence les potentielles carences dans les modalités, et ainsi essayer de déterminer une cause à ce non développement de T2, T3, et T5, qui reste ici inexpliqué.

Dans la littérature, de nombreuses études font état de l'efficacité des fertilisants organiques pour la culture de basilic avec l'obtention de rendements similaires en organique et en minéral (Aboutaleb *et al.*, 2013). Avec les résultats très intéressants obtenus avec T6 dans cette étude, associés à un goût très relevé et satisfaisant des feuilles de basilic, cette option reste prometteuse, et mérite de nouvelles tentatives.

V. 5. L'avenir de la bioponie

Au-delà de l'utilisation de fertilisants organiques pour les cultures de Cueillette Urbaine, cette étude interroge la place de ces changements dans une agriculture plus globale. En effet, en Europe, la réglementation concernant les produits cultivés en agriculture biologique n'autorise pas la labellisation biologique de la production en hors-sol, et la fertilisation en bioponie ne fait pas de différence. À Paris, la demande de bio est importante, et cela peut porter préjudice à une entreprise comme Cueillette Urbaine pour trouver des débouchés. Depuis 2021, le National Organic Program (NOP) du Département américain de l'agriculture (USDA) autorise la certification des cultures «biologiques» produites dans des systèmes hydroponiques, aquaponiques et aéroponiques conformes à la réglementation biologique américaine (Di Gioia

et Roskopf, 2021). Cette démarche répond à la demande grandissante des consommateurs de produits biologiques, et peut pousser au développement de la recherche concernant ces fertilisants. Un changement de ce type concernant la labellisation en agriculture biologique pourrait également permettre aux grosses productions de plusieurs hectares en hors-sol de s'avancer vers ces techniques. Cela relève d'une problématique de réglementation européenne et de communication auprès des consommateurs, représentant un enjeu aujourd'hui pour le développement de la bioaponie. Cela pourrait permettre une plus grande valeur ajoutée des produits, permettant de compenser l'implication supplémentaire que demande une fertilisation en bioaponie. En effet, la réalisation de cette étude insiste bien sur les risques et les aléas que celle-ci représente. L'oxygénation de la solution, l'obturation des modules, les variations d'EC sont des problématiques qui aujourd'hui demandent plus de manipulations, plus de temps, qui doivent être compensés. La dimension du prix peut être également questionnée, et à notre échelle, une discussion au sein de l'entreprise ainsi qu'un état des lieux des quantités utilisées pour l'étude indiquent qu'une utilisation du Pro Organic® seul n'est pas plus coûteuse qu'une utilisation du Tri Part®.

Les études présentant des réserves concernant ces engrais sont donc nombreuses, mais celles-ci restent prometteuses (Bergstrand, 2022), et des techniques d'économie circulaire pour la production de ces engrais voient le jour, répondant également à des problématiques de recyclage de produits toxiques pour l'environnement. Par exemple, une récupération directe des solutions nutritives usées peut être envisagée (Rufi-Salis *et al.*, 2020), et des bioréacteurs pour une minéralisation et nitrification naturelle des déchets de matière organique apparaissent efficaces (Xie *et al.*, 2022). Ces nouvelles techniques permettent d'accompagner le développement de circuits courts en hydroponie. Des estimations datant de 2007 (Fokes, 2007), évaluent une capacité de remplacement des fertilisants chimiques par des déchets urbains à 35 à 45% sur l'agriculture de la ville de Toronto. Ces études permettent des schémas prometteurs pour des possibilités de stimulation de l'économie locale. Cela concorde avec les ambitions de la ville de Paris, qui a pour objectif une restauration collective durable et biologique à 100% d'ici 2027, dont 50% en circuit court de proximité (Ville de Paris, 2022).

VI. Conclusion

Cette étude s'inscrit dans la démarche de transition de l'entreprise Cueillette Urbaine, afin de passer d'une fertilisation minérale à organique pour ses cultures hors-sol, dans un souci de durabilité et de respect de l'environnement. Les tests menés et les résultats obtenus ont ainsi permis de répondre à la problématique de départ, à savoir de mettre en lumière les enjeux que cette transition implique, et d'alimenter la base de données de l'entreprise pour leur prise de décision concernant leur fertilisation. Afin d'assurer l'utilisation du fertilisant organique Pro

Organic® de chez Terra Aquatica sur ses cultures, il était question d'obtenir des rendements aussi efficaces qu'en fertilisation minérale. Et afin de pallier d'éventuelles lacunes, l'association de biostimulants a été évaluée.

Pour la culture de fraises en Aéroflo®, les résultats pour l'utilisation de Pro Organic® sont satisfaisants. En effet, dans le cas d'une culture de fraises Mara des bois avec transplantation de plants adultes, le rendement est aussi bon en organique qu'en minéral. Et malgré l'attention supplémentaire que cela demande en termes de gestion de la fertilisation, le goût prononcé et sucré des fraises obtenus jusqu'à la fin du stage ont permis de prendre la décision de passer les grands modules de culture de fraises de l'Arche Végétale en organique.

Pour ce qui est des cultures de basilics, les gros problèmes de croissance pour certaines des modalités en organique rendent le passage en bioponie risqué. Cependant, l'excellent rendement pour la modalité T6 Pro Organic®, Root Booster® et Hemic® mérite de s'y intéresser davantage. D'autant plus que les autres cultures de basilics en minéral Tri Part® sur la ferme ont eu de très mauvaises croissances cette saison. Il faudra cependant être plus vigilant quant à la nitrification de l'azote.

Bien que la présence de Root Booster® soit corrélée à une augmentation de la reprise racinaire chez les fraises, et à l'augmentation de masse racinaire chez les basilics, elle n'a pas été liée à une augmentation de rendement. Les biostimulants Bloom Booster®, Seaweed® et Urtimax® n'ont pas influencé le rendement dans leur contexte d'application. Ceux-ci sont donc conseillés pour des situations de stress ou de carences, selon leur notice d'utilisation.

Dans cette étude, le contexte d'étude de terrain et de réalisation dans un rythme d'entreprise a contribué à des insuffisances méthodologiques pouvant être relevées. D'ordre scientifique, le nombre d'individus testés pour chaque modalité dans les deux expériences reste insuffisant dans la plupart des tests pour mener à des analyses statistiques. De plus, le manque de matériel de mesure a limité les analyses possibles. Le contrôle de la nitrification de l'azote s'est vu être limité également au niveau des basilics, par manque de tests colorimétriques JBL®. De plus, les individus sont sujets aux aléas extérieurs, et bien que permettant une mise en situation qui était volontaire dans cette étude, cela peut interférer avec les analyses. Les attaques d'oiseaux et les vagues de chaleur fréquentes ont pu interférer avec les rendements.

Malgré les biais potentiels qu'elle comporte et les limites qu'elle rencontre, cette étude permet la démonstration d'une fertilisation organique efficace possible, selon les conditions de culture de l'Arche Végétale. Les résultats satisfaisants rendent la transition et les manipulations, appliquées à une plus grande surface d'application, réalisables. Des précautions devront tout de même être assurées. Cela nécessite un brassage régulier de la solution, un biofiltre adapté

et certainement une obstruction complète des lieux de passage de la solution à la lumière du soleil, afin d'éviter le développement abusif d'algues indésirables.

Cette démarche de transition fait sens avec la production de l'Arche Végétale qui se veut éco-durable, destinée à des instances de restauration ultra-locales. Étant le site vitrine, cela permettra de sensibiliser les visiteurs à la bioponie, et ainsi, de communiquer sur ces questions de transition pour l'organique, et des problématiques des fertilisants chimiques. Dans une plus large visée, cette étude s'inscrit dans l'accompagnement de fermes urbaines pour un passage de cultures hors-sol en bioponie.

Bibliographie

Aboutalebi A., Jahromi M.G., Farahi M.H., (2013). Evaluation of growth and yield of organically-grown basil (*Ocimum basilicum* L.) in soilless culture. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, Vol.11, pp 299-301.

Agriréseau, (2001). Besoins nutritifs et physiologie du fraisier Conférence présentée par Simon Parent. FRUITEK. Journées horticoles de St-Rémi. 8p.

Ahmed, Z.F.R., Askri, A., Alnuaimi, A.K.H., Altamimi, A.S.H.R., Alnaqbi, M.M.A. (2021). Liquid fertilizer as a potential alternative nutrient solution for strawberry production under greenhouse conditions. *Acta Hort.* 1321, 165-172

AlShrouf A., (2017). Hydroponics, Aeroponic and Aquaponic as Compared with Conventional Farming. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*. Vol 27, No 1, 2313-4410. (consulté le 04/05/2022)

Bergstrand K.J., (2022). *Organic fertilizers in greenhouse production systems – a review*. *Scientia Horticulturae*, Vol 295. (consulté le 09/06/2022)

Bethancourt A., (2021). Analyse de la performance de fertilisants organiques issus de l'économie circulaire dans des systèmes aéroponiques en agriculture urbaine. Mémoire de fin d'études, Ingénierie des espaces végétalisés urbains, AgroParisTech, Paris, 75p.

Camprubi L., (2015). Resource Geopolitics: Cold War Technologies, Global Fertilizers, and the Fate of Western Sahara. *Technology and Culture*, Vol. 56, No. 3, pp. 676-703.

Collin F., (2020). Ces petites espèces à (re) découvrir. Les basilics. *Fnams. Bulletin Semences*. Vol 271, 43p.

Cordell D., (2010). The Story of Phosphorus Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security. *Linköping Studies in Arts and Science* No. 509. 220p.

Di Gioia F., and Roskopf E.N., (2021). Organic hydroponics: a US reality challenging the traditional concept of "organic" and "soilless" cultivation. *Acta Hort.* pp275-282.

FAO, FIDA, OMS, PAM et UNICEF, (2021). L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2021. Transformer les systèmes alimentaires pour que la sécurité alimentaire, une meilleure nutrition et une alimentation saine et abordable soient une réalité pour tous. Rome, FAO, 264pages.

Hoagland D. R., (1920). Optimum nutrient solutions for plants. In: *Science*, Vol 52, Issue 1354, pp. 562-564.

Hobon M., (2021). Aquaponie et agriculture urbaine: Analyse des performances du système en culture verticale innovante. Mémoire de fin d'études, Master Sciences-Technologie-Santé, Parcours Agroécologie, Université de Picardie Jules Verne, 36p.

Joly P.B., Pellerin S., Recous S., (2014). Méta-cas – Impact des recherches de l'INRA sur la fertilisation minérale en France. 20 p. (consulté le 04/05/2022).

Krapp A., (2015). Plant nitrogen assimilation and its regulation: a complex puzzle with missing pieces. *Current Opinion in Plant Biology*, Volume 25, pp115-122.

Leduc N., (2020). Cours magistral de productions végétales: Les cultures hors-sol. Université d'Angers. UE S1M-UE7.

Meier U., (2001). Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées. *B BCH Monographie*, Centre Fédéral de Recherches Biologiques pour l'Agriculture et les Forêts. 166p.

Moncada A., Miceli A., Vetrano F., (2021) Use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and organic fertilization for soilless cultivation of basil. *Scientia Horticulturae* 49pages.

Nahmias P., Le Caro Y., (2012). Pour une définition de l'agriculture urbaine: réciprocity fonctionnelle et diversité des formes spatiales. *Environnement Urbain*, Vol 6.

Page A., 2021. « Guerres et fertilisation : essor des engrais azotés en France et en Grande-Bretagne, 1918-1960 ». Publié dans Histoire des modernisations agricoles au XXe siècle, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2021, pp. 39-52.

Paradičković N., Teklić T., Zeljković, S., Lisjak M., Špoljarević M., (2018). Biostimulants research in some horticultural plant species—A review. Wiley. University of Josip Juraj Strossmayer in Osijek, Osijek, Croatia. 17p.

Petit J., et Jobin P., 2005. La fertilisation organique des cultures, Les bases. *Fédération d'Agriculture Biologique du Québec*. ISBN 2-9809006-0-5. (consulté le 24/05/2022).

Phibunwatthanawong T., Riddech N., (2019). Liquid organic fertilizer production for growing vegetables under hydroponic condition. *Int J Recycl Org Waste Agricult*, 8p, 369–380.

Philippe F., (2016). Etude des sources de variation des composés d'intérêt nutritionnel chez la fraise. Mémoire de fin d'études, Sciences Technologie Santé, Production et Technologie du Végétal (ProTeV), Université d'Angers, Angers, 25p.

Ragaveena S., Shirly Edward A., & Surendran U., (2021). Smart controlled environment agriculture methods: a holistic review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 20, 887–913.

Rufí-Salís M., Calvo M.J., Petit-Boix A., Villalba G., Gabarrell X., (2020). Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture: An environmental assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 155

Sardare M.D., Amdane S.V., (2013). Review on plant without soil - Hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Vol 2.

Savci S., (2012). Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. *APCBEE Procedia*, Vol 1, pp 287-292.

Simier P., (2020). Cours magistral de production fruitière: Biologie et physiologie des fruits et des semences. 88 pages.

Texier W., (2013). L'hydroponie pour tous: Tout sur l'horticulture à la maison. Mama éditions, Hydroscope, 358 pages.

Watts D.C.H., Ilbery B., Maye D., (2005). Making Reconnections in Agro-food Geography: alternative Systems of Food Provision. *Progress in human geography*, vol. 29, n° 1, p. 22-40.

Williams K.A., Nelson J.S., (2016). Challenges of using organic fertilizers in hydroponic production systems. *Acta Horticulturae*, (1112), 365–370.

Xie Y., Spiller M., Vlaeminck S.E., (2022). A bioreactor and nutrient balancing approach for the conversion of solid organic fertilizers to liquid nitrate-rich fertilizers: Mineralization and nitrification performance complemented with economic aspects. *Science of The Total Environment*, Volume 806, Part 2.

Yakhin O. I., Lubyantsev A. A., Yakhin I. A., & Brown P. H., (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049.

Zerbino L., (2018). Optimisation de la fertirrigation en culture de fraises hors-sol. Sciences du Vivant. Mémoire de fin d'études, Ingénierie des Productions et des Produits de l'Horticulture, Agrocampus Ouest, Angers, 47p.

Sitographie

Agrimaroc, Fertilisation Minérale des Cultures, MAPD/DERD. Transfert de technologie en agriculture. n°155 (2007). https://www.agrimaroc.net/bulletins/btta_155.pdf (consulté le 12/05/2022)

Bon pote, (2021). Synthèse et analyse du nouveau rapport du GIEC, 2022. <https://bonpote.com/synthese-et-analyse-du-nouveau-rapport-du-giec/> (consulté le 22/03/2022)

Crevette Diplomate, (2020). *La face cachée des engrais pétro-chimiques: leur fabrication*, 2022. (consulté le 18/06/2022)

<https://crevette-diplomate.fr/la-face-cachee-des-engrais-petrochimiques-leur-fabrication/>

Caldor, (2020). La culture de la fraise sous serre : caractéristiques, avantages et préconisations, 2006. <https://caldor.fr/cultures/fraise/> (consulté le 22/08/2022)

Fil Api, (2020), L'usine de fabrication d'engrais Yara de nouveau épinglée, 2022. <https://agence-api.ouest-france.fr/article/lusine-de-fabrication-dengrais-yara-de-nouveau-epingle> (consulté le 15/7/2022)

France AgriMer, (2018). Marché des plantes à parfum, aromatiques et médicinales. LES DONNÉES. Panorama 2018

https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/64168/document/March%C3%A9_PPAM_Panorama_2018.pdf?version=1

General Hydroponics Europe, (2020). Bringing nature and technology together, 2020. <https://www.yumpu.com/fr/document/read/19568338/bioponie-general-hydroponics-europe> (consulté le 12/05/2022).

IPCC, (2019). Climate Change and Land, Summary for Policymakers, 2020. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf

Interfel, (2016). Bilan de campagne Fraise 2016. <https://www.interfel.com/wp-content/uploads/2017/11/bilan-de-campagne-fraise-2016.pdf>

Label Rouge, (2017). La fraise en chiffre, 2022. <https://www.fraiselabelrouge.fr/la-fraise-en-chiffres/#:~:text=La%20production%20de%20fraise%20dans,000%20tonnes%20de%20fraises%20produites.>

Lallemand Félix, Les greniers d'abondance, (2019). La révolution verte et la naissance du système alimentaire industrialisé, 2022.

<https://resiliencealimentaire.org/la-revolution-verte-et-la-naissance-du-systeme-alimentaire-industrialise/#:~:text=En%20France%2C%20entre%201960%20et,les%20surfaces%20cultiv%C3%A9es%20de%2041%20%25.>

Supagro, 2012. Minéralisation et immobilisation, 2022. (consulté le 14/08/2022). <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/MineralisationImmobilisation.html>

Terra Aquatica, (2022). Engrais & Systèmes 2022. (consulté le 06/04/2022) <https://www.terraaquatica.com/fr/biostimulant-organique-universel/humic-3/>

Unifa, 2013. Parlons fertilisation, 2022.(consulté le 7/05/2022) <https://fertilisation-edu.fr/production-ressources/engrais-azotes.html#:~:text=Les%20engrais%20azot%C3%A9s%20simples%20sont,1%27utilisation%20de%20gaz%20naturel>

Université Nice Sophia Antipolis, (2008). La dégradation des sols dans le monde, 2012. <https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/degsol/fertilite-chimique.php> (consulté le 24/08/22)

Usbek & Rica, (2019). Les usines d'engrais aux États-Unis émettent 100 fois plus de méthane que prévu, 2022.

<https://usbeketrica.com/fr/article/les-usines-d-engrais-aux-etats-unis-emettent-100-fois-plus-de-methane-que-prevu> (consulté le 6/07/2022)

Ville de Paris, (2022). AgriParis : une alimentation bio, durable et locale accessible à toutes et tous. 2022. (consulté le 24/08/2022)

<https://www.paris.fr/pages/lancement-de-la-concertation-des-citoyens-en-vue-de-la-creation-d-agriparis-16897> (consulté le 24/08/2022)

Youmatter (2021), Entreprise à mission : définition, 2021. <https://youmatter.world/fr/definition/entreprise-a-mission-definition-quest-ce-quune-entreprise-a-mission/> (consulté le 12/08/2022)

Annexes

Annexe I. Notice d'utilisation du fertilisant minéral Tri Part® pour les cultures hors-sol. (Terra Aquatica, 2022)

	 Hydro	 Coco	 1st roots	 1st true leaves	 Growing	 Pretlowering	 Flowering	 Final Part®	 Flash Clean®
● TriPart Grow			0,5ml/L	1ml/L	1,8ml/L	2ml/L	0,8ml/L	-	-
● TriPart Micro			0,5ml/L	1ml/L	1,2ml/L	2ml/L	1,6ml/L	-	-
● TriPart Bloom			0,5ml/L	1ml/L	0,6ml/L	1,5ml/L	2,4ml/L	-	-
EC (mS)			0,3 - 0,6	0,8 - 1,2	1,3 - 1,8	1,8 - 2,0	1,4 - 2,2	1,4 - 2,6	-

Pro Organic

Engrais organique à haut rendement sans matière animale. Agréé en agriculture biologique

T.A. Pro Organic est une base fertilisante organique sans matière animale, optimisée pour les phases de croissance et de floraison.



La composition spécifique des engrais T.A. Pro Organic est rapidement assimilable. Développée à l'origine dans le cadre de la mise au point de la bioponie (hydroponie organique), la recette a été conçue pour être rapidement bio-disponible et rester stable dans les milieux aérobies. La recirculation, le brassage et l'oxygénation de cet engrais en solution est parfaitement optimisée.



T.A. Pro Organic apporte aussi des micro-organismes bénéfiques. Cet engrais organique n'est pas pasteurisé, ce qui signifie qu'il est vivant et qu'il apporte en plus des matières fertilisantes les organismes capables de les digérer et de les rendre disponibles pour vos plantes dans un temps très court après l'arrosage.



Annexe III. Notice d'utilisation du fertilisant organique Pro Organic® pour les cultures hors-sol.
(Terra Aquatica, 2022)

	 Hydro	 Coco	 1st roots	 1st true leaves	 Growing	 Preflowering	 Flowering	Ripening	Cleaning
● Pro Organic Grow			0,25ml/L	0,5ml/L	2ml/L	1ml/L	-	-	-
● Pro Organic Bloom			0,25ml/L	0,5ml/L	-	1ml/L	2ml/L	2ml/L	-

Annexe IV. Notice d'utilisation pour les différents additifs commerciaux de chez Terra Aquatica.
(Terra Aquatica, 2022)

Supplements



1st roots
 1st true leaves
 Growing
 Preflowering
 Flowering
 Ripening
 Cleaning

Or	Pro Roots	0,2mL/L	0,2mL/L	-	-	-	-	-
	Roots Booster	5mL/L	3mL/L	-	-	-	-	-
Or	Fulvic	-	2mL/L	2mL/L	2mL/L	-	-	-
	Humic	3mL/L	4mL/L	4mL/L	4mL/L	-	-	-
	Seaweed	-	5mL/L	5mL/L	5mL/L	5mL/L	-	-
	Urtimax	-	30mL/L	30mL/L	30mL/L	-	-	-
Or	Pro Bloom	-	-	-	0,2mL/L	0,2mL/L	0,2mL/L	-
	Bloom Booster	-	-	-	5mL/L	5mL/L	5mL/L	-
	TrikoLogic/TrikoLogic S	0,1g/L	-	0,1g/L	-	-	-	-
	Silicate*	-	4g/10L	4g/10L	4g/10L	4g/10L	-	-

Conforms to EU regulations on Organic Agriculture (CE No. 834/2007)

Annexe V. Notices des biostimulants de chez Terra Aquatica utilisés dans l'étude. (Photos par Claire Mouquet, 2022, Terra Aquatica, 2022)

Root Booster
 Produit à usage biostimulant racinaire
Utilisable en agriculture biologique conformément au règlement (CE) N° 834/2007
 Root Booster est un supplément racinaire naturel qui aide les plantes à établir un système racinaire sain et vigoureux.
 Utilisez Root Booster également en trempage pour vos graines afin d'en accroître le pourcentage de germination tout en optimisant la santé du jeune plant. Pour toutes les plantes, pendant l'enracinement et la croissance. Utilisez avec tout engrais, tous substrats, dans votre jardin, et en hydroponie.
 3 - 5 ml/L en terre et en hydro - 3 ml/L en pulvérisation foliaire.

Bloom Booster
 Produit à usage biostimulant racinaire
Utilisable en agriculture biologique conformément au règlement (CE) N° 834/2007
 Bloom Booster est un produit à usage biostimulant puissant qui déclenche une floraison explosive et une fructification massive. Bloom Booster augmente l'activité métabolique et l'assimilation minérale de la plante. Bloom Booster permet à la plante d'exprimer le meilleur de son potentiel génétique.
 Pour toutes les plantes, au moment de la floraison. Utilisez avec tout engrais, tous substrats, dans votre jardin, et en hydroponie.
 3 - 5 ml/L en terre et en hydro - 3 ml/L en pulvérisation foliaire.

Urtimax - purin d'orties liquide
Utilisable en agriculture biologique conformément au règlement (CE) N° 834/2007
 L'ortie est une plante exceptionnellement riche en silice et en fer. Elle est également riche en nitrate, potasse, magnésium, microéléments, trace éléments et enzymes.
 Pour toutes les plantes, à tous les stades de leur développement.
 Utilisez avec tout engrais, tous substrats, dans votre jardin, et en hydroponie.
 30 ml/L en terre et en hydro - 20 ml/L en pulvérisation foliaire.

Seaweed - Extrait d'algues marines pressées à froid
CONFORME AU DECRET N° 2016-532 DU 27 avril 2016 relatif à la procédure d'autorisation des substances naturelles à usage biostimulant
Utilisable en agriculture biologique conformément au règlement (CE) N° 834/2007
 Seaweed est un biostimulant 100% naturel. Il favorise une bonne santé des plantes en stimulant leur métabolisme. Il s'utilise en synergie avec tous types d'engrais.
 Cet extrait est un produit naturel et pur sans additif ni conservateur : il faut donc l'utiliser rapidement après ouverture. Adapté à toutes les plantes, à tous les stades de croissance, à tous les substrats, en culture hydroponique comme dans votre jardin.
 À utiliser à 5 ml/L ajouté à une solution nutritive ou à 3 ml/L sous forme de pulvérisation foliaire.

Humic - acides humiques
Autorisation Mise sur le Marché : 1180294
Matière fertilisante - Solution à base de substances humiques - apport de potassium
 Humic est fait de ligno-humates purs et contient un pourcentage exceptionnellement élevé d'humates actifs pour les plantes. Ces composants organiques améliorent l'absorption des engrais, stimulent l'activité microbienne, améliorent la structure du sol, augmentent la rétention d'engrais et réduisent la consommation d'eau.
MINIMUM GARANTI À L'ANALYSE SUR LE PRODUIT BRUT :

Acides Humiques	9 %
Acides Fulviques	2,2 %
Oxyde de Potassium (K ₂ O) soluble dans l'eau	3,2 %
pH	8



UNIVERSITÉ DE NANTES



université
angers

Diplôme: Master

Mention : Biologie Végétale (BV)

Parcours : Filières de l'Horticulture et Innovations (FHI)

Auteur(s) : Claire Mouquet

Date de naissance* : 01/08/1998

Nb pages : 30

Annexe(s) : 5

Année de soutenance : 2022

Organisme d'accueil : Cueillette Urbaine

Adresse : 3-7 rue Albert Marquet

75020 Paris, France

Maître de stage : Margaux Hobon

Titre français : Bioponie : Étude pour la transition vers une fertilisation organique des cultures hors-sol d'une ferme urbaine.

Titre anglais : Bioponics : Study for the transition to organic fertilization for soil less crops of an urban farm.

Résumé:

La bioponie amène de nouvelles perspectives pour la fertilisation des cultures hors-sol. Cueillette Urbaine, entreprise parisienne à mission pour le développement de l'agriculture urbaine, affiche la volonté de transitionner les cultures de ses fermes en bioponie, dans le but d'une production plus respectueuse de l'environnement. Cette étude accompagne cette transition en évaluant l'efficacité de fertilisations organiques par rapport à une fertilisation minérale sur une ferme de l'entreprise. Les produits de leur partenaire Terra Aquatica sont testés ici et mis en comparaison. Pour des cultures de fraises en système horizontal Aéroflo (Terra Aquatica), l'engrais Pro Organic® a obtenu des résultats à la hauteur de ceux obtenus avec l'engrais minéral Tri Part® (p-values > 0,05) pour la reprise racinaire, la masse fraîche par fruit et les dégustations sensorielles. Les biostimulants Root Booster® et Bloom Booster® dans ce cas n'ont pas eu d'effet significatifs. Pour les cultures de basilics en système vertical Tower Garden® (Juice +), des résultats variables insistent sur l'importance d'une gestion assidue de la fertilisation en organique. L'association Pro Organic®, Root Booster® et biostimulant Humic® a cependant permis d'obtenir des rendements supérieurs aux autres, dont ceux du fertilisant minéral Tri-Part® (p-value > 0,05). Dans cette étude, l'efficacité des engrais organiques est prometteuse, tout en soulignant les enjeux que cette transition implique. Pro Organic® pourra être appliqué aux cultures de Cueillette Urbaine la saison prochaine.

Abstract:

Bioponics offers new perspectives for the fertilization of soilless crops. Cueillette Urbaine, a parisian company with a mission for the development of urban agriculture, has expressed its willingness to transition the crops on its farms to bioponics, to reach the most environmentally friendly production. This study accompanies this transition by evaluating the effectiveness of organic fertilization compared to mineral fertilization in a farm of the company. The products of their partner Terra Aquatica are tested here and compared. For strawberry crops grown in a horizontal Aeroflo® system (Terra Aquatica), Pro Organic® fertilizer obtained results equivalent to those obtained with Tri Part® mineral fertilizer for root recovery (p-values > 0.05), fresh mass per fruit and sensory tasting (p-values > 0.05). The biostimulants Root Booster® and Bloom Booster® in this case had no significant effect. In the Tower Garden® (Juice +) vertical basil system, varying results emphasize the importance of careful organic fertilizer management. However, the Pro Organic®, Root Booster® and Humic® biostimulant association produced higher yields than the others, including the Tri-Part® mineral fertilizer (p-value > 0.05). In this study, the effectiveness of organic fertilizers is promising, while highlighting the challenges involved in this transition. Pro Organic® can be applied to Cueillette Urbaine crops next season.

Mots-clés : Bioponie, hydroponie, fertilisation, agriculture urbaine, culture hors-sol

Key Words: Bioponics, hydroponics, fertilization, urban agriculture, soil less crops

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