



HAL
open science

Revalorisation des biodéchets en milieu urbain pour une culture de salades en aéroponie

Éloïse Groud

► **To cite this version:**

Éloïse Groud. Revalorisation des biodéchets en milieu urbain pour une culture de salades en aéroponie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03015717

HAL Id: dumas-03015717

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03015717>

Submitted on 20 Nov 2020

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

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

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes

<p>Année universitaire : 2019 - 2020</p> <p>Spécialité : Ingénieur Agronome</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Agroecology</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	---

Revalorisation des biodéchets en milieu urbain pour une culture de salades en aéroponie

Par : Eloïse GROUD



(Cueilletteurbaine.com)

Soutenu à Rennes, le 9 Septembre 2020

Devant le jury composé de :

Président : Guénola Pérès

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Maître de stage : Pierre-Frédéric Bouvet

Enseignant référent : Edith Le Cadre

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

Remerciements

Je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier mon maître de stage, Pierre-Frédéric Bouvet, pour m'avoir accompagnée et fait découvrir le monde professionnel de l'agriculture urbaine. Je le remercie également pour ses pertinents conseils et la confiance qu'il m'a accordée dans la réalisation de l'expérimentation.

Je remercie également ma directrice de mémoire Edith Le Cadre, Professeure en Agronomie à l'école d'Agrocampus Ouest, pour ses judicieux conseils qui ont largement contribué à ma réflexion.

Je tiens ensuite à témoigner ma sincère reconnaissance à toute l'équipe pédagogique de la spécialisation Agroécologie, les intervenants professionnels responsables de ma formation pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci. Un immense merci à Guenola Peres, référente de la spécialisation Agroécologie, pour avoir rendu cette année aussi passionnante que rigoureuse, et pour m'avoir apportée un réel soutien durant mon stage.

Je souhaiterais aussi remercier chaleureusement toutes les personnes suivantes, qui n'ont cessé de m'accompagner dans la réalisation de ce mémoire :

- Toute l'équipe de Cueillette Urbaine, Paul Rousselin, Maëva Hilpron, Lucile Delorme et Bénédicte Martin pour m'avoir aussi bien intégrée à l'équipe, pour leur disponibilité et leur bonne humeur.
- Mes amis proches et camarades de spécialisation qui ont rendu cette année mémorable.

Enfin, une sincère reconnaissance s'adresse à ma famille, mes parents et ma sœur, qui m'ont toujours soutenue, encouragée et accompagnée dans mon parcours aussi bien personnel qu'éducatif.

Table des matières

Table des matières	7
Introduction	1
1. Matériels et méthodes	5
1.1. Matériels	5
2. Méthodes	15
2.1. Mise en place de l'expérimentation	15
2.2. Méthode mise en place pour répondre à la problématique principale	15
2.2.1. Stabilisation de la solution nutritive selon les besoins physiologiques de la salade	15
2.2.2. Mesures des paramètres adaptés pour évaluer l'efficacité des fertilisants.....	19
2.2.2.1. Suivi de la croissance des salades : la surface foliaire.....	19
2.2.2.2. Des mesures effectuées en fin d'expérimentation.....	21
2.2.3. Calcul des concentrations apportées en N, P et K.....	23
2.3. Analyses statistiques.....	25
2.3.1. Description des jeux de données.....	25
2.3.2. Modèles appliqués grâce au logiciel R	25
2.3.3. Troisième tableau : traitement des données avec Excel.....	27
3. Résultats	27
3.1. Analyse visuelle : évolution de l'aspect des tours au cours du temps	29
3.2. Variation de pH, EC et température de l'eau	29
3.3. Taux de croissance relatif.....	31
3.4. Taux de montaison : l'évolution par semaine.....	31
3.5. Masse fraîche à la récolte.....	33
3.6. Taux de mortalité	33
3.7. Variation des concentrations ajoutées en N, P et K.....	33
3.8. Taille racinaire.....	33
3.9. Surface foliaire	35
4. Interprétation et discussion.....	35
4.1. Interactions des facteurs abiotiques entre eux et avec les paramètres de croissance 35	
4.2. Performance de l'association Biosevia et thé de compost	39
4.3. Résultats des salades cultivées à base d'urine	39
4.4. Analyse économique de la rentabilité des fertilisants.....	41
4.5. Des normes obligatoires pour commercialiser les fertilisants organiques	45
4.5.1. Explication des différentes procédures envisageables	45
4.5.2. Normalisation des fertilisants utilisés	47
5. Conclusion et perspectives.....	47

5.1. Réponse à la problématique principale et aux hypothèses soulevées	47
5.2. Perspectives d'avenir	49
Annexes	65
Annexe I : Composition du Maxigro	65
Annexe II : Composition du Biosevia.....	67
Annexe III : Composition du thé de compost.....	69
Annexe IV : Composition du digestat de méthanisation	71
Annexe V : Composition de Bactipi	73
Annexe VI : Plan du toit de Cuisine Mode d'Emploi(s), 3-5 Rue Albert Marquet 75020 Paris	75
Annexe VII : Tableau récapitulatif des données mesurées.....	77
Annexe VIII : Exemple des deux premiers jeux de données.....	79
Annexe IX : Evolution de l'aspect visuel des salades	81
Annexe X : Evolution de la température extérieure maximale durant toute l'expérimentation	83
Annexe XI : Fiche technique du produit Bactipi	85
.....	85
Annexe XII : Clef de détermination simplifiée pour l'obtention d'une AMM	87
Annexe XIII : Recycling of bio-waste in an urban environment for aeroponic lettuce production.....	89

Glossaire

Aéroponie : système où les racines sont continuellement ou de façon discontinue dans un environnement saturé de fines gouttes (un brouillard ou un aérosol) de solution nutritive (Lakhiar et al. 2018)

Agriculture urbaine : pratiques agricoles dans les villes qui utilisent des ressources - terre, eau, énergie, main-d'œuvre - pouvant également servir à d'autres usages pour satisfaire les besoins de la population urbaine (FAO 1999b)

Amendement : destinés à modifier ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols (Direction Générale des Entreprises 2017)

Biologique : l'agriculture biologique constitue un mode de production qui trouve son originalité dans le recours à des pratiques culturales et d'élevage soucieuses du respect des équilibres naturels. Ainsi, elle exclut l'usage des produits chimiques de synthèse, des OGM et limite l'emploi d'intrants (« Agriculture biologique : quelle réglementation ? » 2017)

Bioponie : pratique dérivée de l'hydroponie, elle consiste à cultiver des plantes hors-sol à l'aide d'une solution nutritive organique et biologique (« Bioponie – Culture hydroponie organique » s. d.)

Bistimulant : améliorer l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs des végétaux, la tolérance au stress abiotique, les caractéristiques qualitatives ou à augmenter la disponibilité des éléments nutritifs confinés dans le sol ou la rhizosphère (*Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) no 1069/2009 et (CE) no 1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) no 2003/2003 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) 2019*)

Economie circulaire : système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien être des individus (ADEME 2018)

Electro-conductivité : mesure de la vitesse à laquelle un petit courant électrique circule dans une solution. Lorsqu'il y a une plus grande concentration de nutriments, le courant circule plus rapidement, et lorsqu'il y a une plus faible concentration, le courant circule plus lentement. En mesurant la conductivité, il est possible de déterminer la force ou la faiblesse d'une solution nutritive. Souvent exprimée en 1 mS/cm (Mason 1996)

Engrais : destinés à apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition. Il peut s'agir d'éléments fertilisants majeurs ou secondaires ou encore d'oligo-éléments (Direction Générale des Entreprises 2017)

Facteurs abiotiques : phénomènes physico-chimiques : lumière, température, humidité de l'air, composition chimique de l'eau, pression atmosphérique et hydrostatique, structure physique et chimique du substrat (Universalis s. d.)

Fertilisant : produit destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ou les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Il comprend les engrais, les amendements et les biostimulants (Direction Générale des Entreprises 2017)

Hydroponie : technique de culture des plantes sans terre. Les racines poussent soit dans l'air, qui est maintenu très humide ; dans de l'eau, qui est bien aérée ; ou dans un milieu solide, non salissant, qui est conservé humide. L'eau qui entoure les racines contient un mélange soigneusement équilibré de nutriments qui fournit de la nourriture pour la plante (Mason 1996).

Organique : apport naturel de fertilisation (biodéchets, effluents d'élevage etc). Tout apport synthétique interdit. L'agriculture organique est une des possibles formes de l'agriculture durable (FAO 1999a)

Table des sigles

AFNOR : Association Française de Normalisation

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail

CE : Comité Européen

EC : Electro-conductivité

FAO : Food and Agriculture Organization

FM : Fertilisant Minéral

FO : Fertilisant Organique

FOB+C : Association Biosevia et thé de compost

FOC : Fertilisant à base de thé de compost

FOD : Fertilisant à base de digestat

FOU : Fertilisant à base d'urine

GHE : General Hydroponics Europ

ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

K : Potassium

N : Azote

P : Phosphore

pH : Potentiel Hydrogène

Table des illustrations

Table des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif du dispositif expérimental et des fertilisants utilisés / Summary table of the used fertilizers (Source : Auteur)	14
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des données initiales d'EC, pH et température de l'eau pour chaque tour, avant le premier ajout de fertilisant / Summary table of initial EC, pH and water temperature data for each tower, before the first fertilizer addition (Source : Auteur)	16
Tableau 3 : Données analysées sur Excel / Excel analyse of data (Source : Auteur).....	26
Tableau 4 : Concentration des différents fertilisants en éléments majeurs / Major element nutrient concentrations for each fertilizer (Source : Auteur).....	32
Tableau 5 : Récapitulatif des prix et quantités de fertilisant utilisés / Summary of prices and used quantities for each fertilizer (Source : Auteur).....	40
Tableau 6 : Marge finale sur une tour de cinq étages en fonction des fertilisants / Production cost of a five-storey tower for each fertilizer (Source : Auteur).....	40

Table des figures

Figure 1 : Laitue merveille des quatre saisons / Merveille des quatre saisons lettuce (Source : zollinger.bio).....	4
Figure 2 : Photo d'une Tower Garden / Picture of a Tower Garden (Source : towergarden.com).....	4
Figure 3 : Schéma d'une tour à plat / Scheme of a tower as a plan (Source : Auteur).....	14
Figure 4 : Graphique représentant l'évolution de l'EC dans la solution nutritive / Graph of the evolution of EC into the nutrient solution (Source : Auteur).....	28
Figure 5 : Graphique représentant l'évolution du pH dans la solution nutritive / Graph of evolution of pH into the nutrient solution (Source : Auteur).....	28
Figure 6 : Graphique représentant l'évolution de la température de l'eau dans la solution nutritive / Graph of the evolution of nutrient solution temperature (Source : Auteur).....	28
Figure 7 : Histogramme comparant les valeurs des taux de croissance relatifs en fonction des fertilisants / Histogram comparing values of the relative growth rate as a function of fertilizers (Source : Auteur).....	30
Figure 8 : Histogramme représentant l'évolution du taux de montaison pour chaque fertilisant / Histogram representing the evolution of the bolting rate for each fertilizer (Source : Auteur).....	30
Figure 9 : Histogramme représentant les masses récoltées pour chaque tour / Histogram representing the weight of all salads per Tower (Source : Auteur).....	30
Figure 10 : Diagramme en boîte représentant l'augmentation de taille racinaire en fonction des fertilisants / Box plot representing the increase of root length according to each fertilizer (Source : Auteur).....	32
Figure 11 : Diagramme en boîte représentant l'influence du type de fertilisant sur la surface foliaire / Box plot representing the influence of the type of fertilizer on the leaf area (Source : Auteur).....	34
Figure 12 : Représentation exponentielle de la surface foliaire en fonction du temps, par type de fertilisant / Exponential representation of the leaf area along time for each fertilizer (Source : Auteur).....	34
Figure 13 : Biodisponibilité des éléments nutritifs en fonction du pH / Biodisponibility of major elements according to the value of pH (Source : (Argo 2003))	36
Figure 14 : Schéma conceptuel / Conceptual scheme.....	48

Avant-propos

Ce stage de fin d'étude a été réalisé dans des conditions sanitaires particulières : entamé avant le confinement en mars 2020 et suspendu jusqu'en mai de la même année, la mission confiée s'est déroulée jusqu'au 31 août 2020 et a pu rencontrer certaines difficultés liées à l'épidémie du Covid 19. En effet, en fonction de la nature de certains fertilisants (biodéchets) et de la disponibilité des fournisseurs, leur approvisionnement était plus ou moins facilité : un contact réalisé bien en amont a été nécessaire avec les fournisseurs mais n'a pas pu, dans certains cas, palier à une communication difficile. L'envoi des fertilisants à base d'urine et de digestat a donc rencontré des délais qui a induit une pénurie des deux fertilisants à deux moments différents de l'expérience. L'urine a pu être réapprovisionnée contrairement au digestat, c'est pourquoi une chute de la valeur de l'électro-conductivité pour ses deux fertilisants a été observée, et les effets seront discutés par la suite.

Introduction

De plus en plus de villes sont aménagées pour lutter contre le changement climatique (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme 2010) : en effet, de nombreux questionnements émergent quant à l'impact des systèmes humains sur le climat, mais aussi concernant l'effet du changement climatique sur les citoyens. La demande sociale, combinée à la prise de conscience environnementale et écologique, amène donc les acteurs urbains à vouloir restaurer la nature en ville, en suivant l'Engagement Grenelle de 2007 pour répondre aux enjeux du changement climatique (Les services de l'État en Loire-Atlantique s. d.). De plus, les enjeux environnementaux et alimentaires sont étroitement liés : l'effondrement de la biodiversité, l'épuisement des sols et la déplétion des énergies fossiles rendent le système agro-alimentaire d'aujourd'hui très vulnérable (Mayol et Gangneron 2019). En réponse à cela, l'agriculture urbaine s'est donc développée puisqu'elle est définie par la FAO en 1999 comme des « pratiques agricoles dans les villes et autour des villes qui utilisent des ressources (terre, eau, énergie, main d'œuvre) pouvant également servir à d'autres usages pour satisfaire les besoins de la population urbaine » (Morel-Chevillet 2016). L'agriculture urbaine professionnelle a donc commencé à se développer il y a une dizaine d'années : l'Association Française d'Agriculture Urbaine Professionnelle compte aujourd'hui 45% des structures en Ile-de-France, donc 20% en Hors sol et 50% en pleine terre (Haddad 2018).

L'hydroponie caractérise de manière générale la culture hors-sol (Mason 1996) : l'un des dérivés correspond à l'aéroponie (racines en suspension à l'intérieur d'une tour, où la solution nutritive est aspergée) (« Cueillette Urbaine » 2020). La bioponie se distingue de l'hydroponie en imposant un mode de culture à base de fertilisants organiques. Un fertilisant est un produit destiné à assurer ou améliorer la nutrition des végétaux ou les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Direction Générale des Entreprises 2017). Ils comprennent : les engrais (apport des éléments directement utiles aux plantes), les amendements (amélioration des propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols) et les biostimulants (stimulation des processus naturels des plantes). Plusieurs types de fertilisants peuvent être utilisés. Les fertilisants minéraux sont fabriqués à base de sources non renouvelables (Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt 2016) : la plupart sont extraits de roche en quantités épuisables à échelle du temps humain. Les fertilisants organiques, au contraire, peuvent être fabriqués à partir de la réutilisation de biodéchets : leur gestion permettrait de limiter la mise en décharge et d'éviter l'incinération des ressources organiques réutilisables. L'utilisation des fertilisants organiques permet aussi de recréer un environnement proche de celui du sol, en ce sens qu'ils favorisent l'intervention de micro-organismes qui accélèrent la minéralisation de la matière organique. La bioponie permet donc aux agriculteurs de s'ancrer pleinement dans une démarche agroécologique : concevoir un système de production qui s'appuie sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes, diminuer les pressions sur l'environnement et préserver les ressources naturelles (Agriculture.gouv 2013).

La démarche agrécologique de la bioponie en agriculture urbaine s'inscrit donc totalement dans l'économie circulaire (ADEME 2018) : système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources, diminuer l'impact environnemental et développer le bien-être des individus. En effet, la proximité avec les consommateurs, le recyclage de l'eau et le recyclage des déchets sont les trois premiers grands principes de l'économie circulaire : le dernier fait référence à la loi anti-gaspillage de février 2020 (ADEME

2019) et place les fermes urbaines au centre d'un flux fermé d'aliments et de déchets. Enfin, l'optimisation de l'espace urbain, 4^e grand principe, incite à un meilleur usage du foncier existant. L'Île-de-France est déjà bien ancrée dans le développement de l'agriculture urbaine : dans le cadre de l'appel à projet Les Parisculteurs (Ville de Paris 2016), la mairie de Paris met à disposition 46 toitures pour végétaliser la ville, avec comme objectif d'atteindre 100 ha dont un tiers serait consacré à l'agriculture urbaine. C'est grâce à cet appel à projet lancé en 2016 qu'est née la ferme urbaine productive de Cueillette Urbaine sur le toit de l'école de cuisine, Cuisine Mode d'Emploi(s), dans le 20^e arrondissement de Paris (« Cueillette Urbaine » 2020). La démarche agroécologique de cette ferme est très prononcée, puisqu'elle s'inscrit dans un processus de vente locale. L'enjeu est donc maintenant de produire de manière éco-responsable, et de ne s'approvisionner qu'en fertilisants organiques issus de la réutilisation de biodéchets : c'est dans cette volonté de favoriser la bioaponie que l'expérimentation a été lancée. L'objectif est donc de répondre à la question suivante : dans quelles mesures une fertilisation à base de produits organiques issus de la réutilisation de biodéchets peut-elle être aussi performante qu'une fertilisation à base de produits minéraux commerciaux ?

Plusieurs hypothèses sont posées de la manière suivante :

- Les fertilisants minéraux commerciaux étant utilisés en hydroponie, ils sont plus propices à maintenir la solution nutritive stable et donc à mener vers une meilleure production
- Les fertilisants organiques liquides issus de biodéchets sont moins propices à maintenir la solution nutritive stable et leur quantité se doit d'être adaptée de manière empirique pour atteindre la bonne valeur de l'électroconductivité souhaitée
- Si les fertilisants organiques sont utilisés en quantités variables, les marges finales extraites de la vente de la production de salade seront plus donc plus approximatives et moins adaptées à une ferme productive
- La commercialisation des fertilisants organiques issus de biodéchets est encore ralentie au vu des normes très réglementaires pour obtenir une autorisation de mise sur le marché

Afin de répondre à la problématique principale et de vérifier ou non les hypothèses soulevées, la stratégie adoptée sera la suivante : tester des fertilisants organiques, issus de la réutilisation de biodéchets comme le digestat de méthanisation, le thé de compost et l'urine, ou déjà commercialisés comme le Biosevia, et de comparer leur efficacité avec celle du Maxigro, fertilisant minéral commercial. L'expérience se fera en aéroponie sur une culture de salades. Des analyses statistiques seront réalisées pour différencier les cultures en fonction des paramètres de leur solution nutritive, mais aussi en fonction des paramètres de croissance des salades. Enfin, une analyse économique ainsi qu'une mise au point sur les normes à respecter pour la commercialisation des fertilisants organiques permettra de préciser le choix de la fertilisation la plus optimale.



*Figure 1 : Laitue merveille des quatre saisons / Merveille des quatre saisons lettuce
(Source : zollinger.bio)*



*Figure 2 : Photo d'une Tower Garden / Picture of a Tower Garden (Source :
towergarden.com)*

1. Matériels et méthodes

1.1. Matériels

- Laitue : Merveille des quatre saisons (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

Le choix de la culture de salade s'est fait selon les arguments suivants : la salade est un plant peu cher (0.50 cts l'unité), facile d'approvisionnement et répandu en culture bioponique notamment pour sa croissance rapide, de quatre semaines environ (Mason 1996).

Les plants de salade cultivés dans la laine de roche ont été obtenus chez Pepin Production : Cueillette Urbaine s'y procure les plants destinés à la bioponie tout comme à la culture en pleine terre. Pépin Production est une association « dont l'objectif est d'accompagner de manière responsable le processus de végétalisation en ville au tout début du cycle de la plante » (Pépin Production s. d.), en créant des pépinières de quartier et en approvisionnant les écoles, paysagistes jardiniers ou encore les cuisiniers.

La laitue choisie est donc la laitue pommée merveille des quatre saisons (*Lactuca sativa*) : c'est une variété ancienne de France et vigoureuse. Elle est référencée dans le catalogue des « Plantes Potagères » de Vilmorin-Andrieux de 1883 (Kokopelli.fr). Cette laitue est caractérisée par une pomme arrondie, de couleur rouge vif au sommet. Elle peut être semée en toutes saisons, mais surtout au printemps et en été. Cette variété a notamment été choisie car elle est très résistante aux grandes chaleurs (Pépinière des Carlines 2015), lente à la montée en graine et nécessite une exposition de mi-ombre à ensoleillée. Sa saveur est prononcée, sa masse à la récolte se situe entre 120 et 180g.

- Dispositif expérimental en aéroponie

L'aéroponie se définit de la manière suivante : système où les racines sont continuellement, ou de façon discontinue, dans un environnement saturé de fines gouttes (un brouillard ou un aérosol) de solution nutritive (Lakhiar et al. 2018). Dérivée de l'hydroponie, elle fait donc partie des techniques de culture hors sol. Elle est décrite comme la meilleure méthode de culture pour la sécurité alimentaire et le développement durable. Le système a donné des résultats prometteurs dans divers pays et a été recommandé comme le système de culture des plantes le plus efficace, le plus utile, le plus économique et le plus pratique, après la culture en terre et les autres méthodes sans terre.

Les tours sont des dispositifs qui induisent un nombre très important d'interactions biotiques comme abiotiques, concernant le pH, l'EC, la température de l'eau, la solution nutritive ou encore les populations bactériennes. Les tours utilisées proviennent de l'entreprise américaine Tower Garden commandées en amont de l'installation du site sur le toit de Cuisine Mode d'emploi(s) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les tours réservées à l'expérimentation étaient au nombre de 6, composées de cinq étages, et de quatre plants par étage : 20 plants de salade par tour.

Une tour d'aéroponie bénéficie d'un circuit d'eau fermé, dont le mouvement est entretenu par une pompe : elle envoie l'eau au sommet de la tour et fait ruisseler l'eau sur les racines à l'air libre, orientées vers le centre de la tour. Les plants sont maintenus par un support en laine de roche, dans un panier contenant des billes d'argiles pour maximiser la rétention de la solution nutritive aspergée. La laine de roche horticole est disponible sous forme de fibre libre ou en plaque préformées de forme et profondeur variées. Ce matériau est utilisé pour son

très bon niveau d'aération, sa grande capacité à retenir l'eau et sa faible capacité d'échange de cations : elle n'a pas d'effet sur le pH (Mason 1996).

Les cuves des tours ont été maintenues remplies à 60L (réajustement à 60L au moyen d'une marque sur la cuve et d'un débitmètre à la sortie du tuyau pour quantifier l'apport en eau rajoutée). Il est nécessaire d'ajuster le niveau d'eau en fonction des pertes dues à l'évapotranspiration des feuilles de laitues, mais aussi à la prise d'eau par les racines (Sublett, Barickman, et Sams 2018).

Un bio filtre a été positionné au sommet de chacune des tours contenant un fertilisant organique : les biofiltres en céramique constituent un support important pour les micro-organismes. En effet, ceux-ci sont nombreux en bioponie, de nature variable et apportent plusieurs bénéfices : ils réduisent les maladies et améliorent les qualité et productivité de la plante (Lee et Lee 2015). Les bactéries paraissent être les micro-organismes les plus présents, en particulier les bactéries de la famille des *Pseudomonas* et des *Bacillus*. L'intérêt de la culture hors sol par des fertilisants organiques est donc bien de favoriser la présence de ces populations bactériennes et de fournir à la laitue un environnement aussi vivant que possible. La bioponie permettrait même de pouvoir observer des symbioses entre les plants et certains mycorhizes. En effet, en système aéroponique, il est possible d'observer la sporulation abondante de *Glomus mossae* et *Glomus intraradices* en culture de *Paspalum notatum* (graminée vivace) (Sylvia et Hubbell 1986).

- Matériel de mesure

Une sonde de mesure de pH, d'EC et de température de l'eau de la marque HDM digital a été utilisée pour relever ces paramètres, trois fois par semaine dans chaque tour. Son niveau d'incertitude est de 0.1 mS, son étalonnage a été effectué avec une solution neutre et la même sonde a été utilisée pour toutes les mesures.

La liste de matériel suivante a été utilisée pour prélever les fertilisants en fonction de la quantité à rajouter et du type de fertilisant : pour les fertilisants liquides, des éprouvettes de 50mL +/- 0.05, de 20mL +/- 0.05 et un bécher de 1L +/- 0.1 ont été nécessaires, tandis qu'une balance de précision (+/- 0.1g) a été utilisée pour quantifier les ajouts du fertilisant solide.

Une balance de cuisine d'une capacité de 5kg à une précision de 50g a été utilisée pour peser la masse fraîche le jour de la récolte. La surface foliaire et la taille racinaire ont été mesurées grâce à un ruban mètre, de précision 1mm.

Le matériel utilisé pour ajuster les paramètres de la solution nutritive dans chaque cuve est le suivant :

- pH down, de la marque GHE : s'utilise durant la croissance et la floraison, et correspond à un mélange unique d'acides et de tampons organiques qui baissent et stabilisent le pH de la solution nutritive.
- Les fertilisants utilisés : c'est le terme fertilisant qui a été choisi, pour rester dans un contexte global et pouvoir comparer tous leurs intérêts agronomiques. Un témoin minéral commercial et quatre fertilisants organiques ont été choisis, dont un commercial. Les trois autres ont été choisi car rarement testés en bioponie : le thé de compost, le digestat de méthanisation et l'urine.

- Maxigro, fertilisant commercial minéral (Annexe I : Composition du Maxigro) : témoin de l'expérimentation

Elaboré par General Hydroponics Europe (Culture Indoor s. d.), ce fertilisant minéral ultra concentré en poudre est utilisé aussi bien pour l'hydroponie que pour la culture en pleine terre. Maxigro est le fertilisant le plus concentré de GHE, c'est pourquoi il a été choisi comme témoin : il est optimal en ce qui concerne la culture en hydroponie à base de fertilisants minéraux. Sa composition est faite de tous les nutriments nécessaires à la croissance des plantes et d'un régulateur de pH. Ceci permet d'éviter les variations de pH et d'EC extrêmement fréquentes en bioponie (General Hydroponics Europe s. d.). A la différence de tous les fertilisants qui vont suivre, il ne peut pas être considéré comme organique ni biologique.

- Biosevia, fertilisant commercial organique (Annexe II : Composition du Biosevia).

Elaboré par GHE également, ce fertilisant organique est très concentré, et tous ses constituants sont certifiés 100% biologiques. D'après les renseignements obtenus auprès de GHE, il s'agit de vinasses d'origine européenne : vinasses de betterave, d'aloë et de canne à sucre. Aucune autre précision n'est apportée sur le site de General Hydroponics Europ, mais d'autres recherches plus approfondies sur la vinasse de betterave mènent à considérer cet élément comme un très bon engrais organique. En effet, la vinasse de betterave est un produit brut peu transformé (ANPEA-Filière Fertilisation 2013) autorisé en agriculture biologique, et fournit de l'azote rapidement disponible aux cultures (Agricultures & Territoires - Chambres d'agriculture Aube Marne Haute-Marne 2018).

- Thé de compost : Les Alchimistes (Annexe III : Composition du thé de compost)

Le thé de compost est reconnu comme un produit naturel très prometteur, de par ses qualités phytoprotectrices et phytostimulantes (Maud Tragin - Astrédhor, s. d.). En effet, ces deux actions sont principalement liées à l'activité des micro-organismes présents dans le mélange : ils stimulent le développement des plantes en améliorant la production d'hormones et la résistance aux stress abiotiques. Son application en arrosage a été testée sur des cultures d'amélanchier et semble diminuer la propagation des maladies présentes dans le sol, mais aussi les foyers d'oïdium (Astrédhor-Institut technique de l'horticulture, s. d.).

Le thé de compost est un produit s'obtenant de deux manières différentes : la première correspond à l'anaérobie. On parle ici de fermentation : il s'agit d'une véritable « infusion » d'un compost préalablement élaboré pendant plusieurs heures (24h à 48h). Le produit fini est donc d'apparence très liquide, concentré en éléments nutritifs et micro-organismes. Le thé de compost produit en conditions aérobie correspond également à une infusion d'un compost existant, mais à l'aide d'un bulleur : l'objectif est de limiter les mauvaises odeurs et de concentrer les micro-organismes vivants. L'utilisation du thé de compost sur une culture diffère en fonction de son mode et de sa fréquence d'application : il est utilisé autant en arrosage et irrigation qu'en pulvérisation foliaire, et de manière hebdomadaire (Astrédhor-Institut technique de l'horticulture, s. d.).

Le thé de compost a donc été retenu comme un des fertilisants organiques à tester pour son action phytostimulante, mais aussi car son utilisation seule apparaît trop peu dans la littérature concernant la bioponie. L'objectif était donc de tester son efficacité seule, en tant qu'engrais dans la tour n°3, mais aussi en interaction avec le fertilisant organique commercial

pour vérifier ses actions biostimulantes complémentaires avec un autre fertilisant dans la tour n°4, comme il avait été testé auparavant par Astrédhor.

Le thé de compost utilisé ici a été élaboré par Les Alchimistes (Les Alchimistes s. d.) : spécialisés dans le recyclage et la valorisation des biodéchets urbains en les transformant en compost, ils sont situés à l'île Saint-Denis, au nord de Paris. L'utilisation de leur thé de compost pouvait donc faire partie d'une véritable économie circulaire en servant de fertilisant pour les cultures en aéroponie, qui seraient ensuite distribuées de manière locale à Cuisine Mode d'emploi(s) et aux autres associations comme Alma Grow in town (« ALMA Grown in town - Jardinerie parisienne » s. d.). Les Alchimistes fabriquent un compost fait de tous les déchets alimentaires des établissements de la région parisienne (restes de repas, épluchures de fruits ou légumes dont agrumes, marc de café, poisson, viande etc). Aucune restriction n'est apportée au niveau des matières à composter, contrairement à un composteur de quartier, ce qui limite encore une fois la perte des déchets urbains alimentaires comme végétaux. Le thé de compost qui a été fourni par Les Alchimistes a été fabriqué en conditions anaérobies, avec un compost ayant subi 8 semaines de maturation, et récupéré sur place pour être ensuite utilisé directement dans les tours.

- Digestat de méthanisation : Zoo de Beauval (Annexe IV : Composition du digestat de méthanisation)

Naturellement utilisé dans les plans d'épandage, le digestat de méthanisation fait lui aussi partie du processus de revalorisation des déchets, urbains ou issus des cultures. En effet, les unités de méthanisation libèrent deux co-produits, dont le digestat. Il peut être épandu selon un plan d'épandage bien rigoureux sans traitement, et sera considéré comme du digestat brut. Mais il peut aussi subir une séparation de phase, et donner deux digestats différents (Service méthanisation-machinisme. Chambre d'Agriculture région Nord-Pas de Calais 2018) : la phase solide sera considérée alors comme amendement (Direction Générale des Entreprises 2017), alors que la phase liquide constituera 75% du digestat brut et sera considérée comme un engrais organique.

C'est donc la phase liquide qui a été utilisée ici, car elle constitue un engrais organique NPK à faible concentration (voir annexe fiche d'analyse) et son caractère agronomique n'ayant pas été testé en bioponie, il est intéressant d'évaluer les pouvoirs fertilisants du digestat liquide en culture hors sol. Un partenariat s'est vite établi avec le Zoo de Beauval : les unités de méthanisation plus proches, en région parisienne par exemple, n'étaient pas en mesure de fournir du digestat lors du commencement de l'expérimentation, suite aux conditions particulières du confinement de mars à mai 2020. Dans l'unité de méthanisation du Zoo de Beauval, 11000 tonnes de biodéchets sont traitées par an (ADEME 2017) : 50% proviennent de fumiers de bovins, résidus de céréales, lisiers porcins et déchets verts de collectivité, et 50% sont des biodéchets générés par le parc (déchets verts et fumiers). Des échantillons gratuits ont été envoyés au début de l'expérimentation, mais très vite ces quantités ne furent pas suffisantes et, suite à de très longs délais de communication, l'approvisionnement de digestat en milieu d'expérience n'a pas pu avoir lieu : une pénurie de ce fertilisant a donc induit une baisse de l'EC dans la tour concernée. Les effets de cette baisse d'EC seront discutés après les résultats.

- Urine : Toopi-organics (Annexe V : Composition de Bactipi)

Toujours dans le but de tester des fertilisants valorisant la réutilisation des biodéchets, l'urine humaine a été utilisée dans cette expérimentation afin de tester ses pouvoirs fertilisants

en culture hors sol. Par définition, l'urine humaine est un déchet liquide du corps humain sécrété par les reins au moyen d'un processus de filtration du sang appelé urination et excrété par l'urètre (Karak et Bhattacharyya 2011). Chaque individu adulte excrète en moyenne 500L d'urine par an : le recyclage de l'urine paraît donc de plus en plus essentiel pour s'inscrire dans une revalorisation des biodéchets. En effet, l'azote est actuellement considéré comme un polluant de l'eau et l'urine représente environ 75% du flux d'azote des eaux usées domestiques. De toutes les excréments humaines, l'urine contient la majeure partie des rejets d'azote, de phosphore et de potassium (respectivement 88%, 67% et 73%), mais ces concentrations varient naturellement en fonction de chaque individu. L'urine humaine est constituée de 75% à 90% d'urée, le reste correspondant à la créatinine, les amino-acides et l'acide urique (Karak et Bhattacharyya 2011).

L'intérêt agronomique apparaît alors comme étant le suivant (Jönsson et al. 2004) : la grande majorité de la fraction d'azote dans l'urine est absorbée par la plante, de manière comparable aux fertilisants à base d'urée ou d'ammonium, avec une efficacité de l'azote égale à 90% de celle d'un fertilisant minéral. D'après une étude faite sur des choux (choisis pour leurs importants besoins en azote), l'usage de l'urine en tant que fertilisant accroît la biomasse, mais induit aussi une croissance plus rapide (Pradhan et al. 2007). Deux ans plus tard, une étude sur des tomates validait les résultats et assuraient que les quantités de tomates produites avec de l'urine étaient aussi importantes qu'avec un fertilisant minéral (Pradhan, Holopainen, et Heinonen-Tanski 2009). Des résultats si concluants pour des cultures en pleine terre ne demandent donc qu'à être vérifiés en culture hors sol, d'autant plus que l'urine est très soluble dans l'eau et pourrait constituer un très bon fertilisant liquide.

L'urine utilisée a été fabriquée par Toopi-organics, start-up française qui collecte, transforme et valorise l'urine humaine provenant de festivals, de laboratoires ou établissement public en produits pour l'agriculture et l'industrie (Toopi Organics s. d.). Le produit utilisé correspond à Bactipi : un biostimulant à base d'inoculum de bactérie. Par définition, un biostimulant correspond à « *une substance qui stimule le processus de nutrition des végétaux indépendamment des éléments nutritifs qu'ils contiennent, dans le seul but d'améliorer une ou plusieurs caractéristiques suivantes des végétaux ou de leur rhizosphère : l'efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs, la tolérance au stress abiotique ou encore la disponibilité des éléments nutritifs confinés dans le sol ou la rhizosphère* » (Biostimulant agriculture 2019). Les biostimulants accélèrent donc les processus naturels des plantes, favorisant la qualité des rendements. A la demande du directeur technique de Cueillette Urbaine, l'action de Bactipi a tout de même été testée seule dans une tour afin de valider ou invalider son efficacité fertilisante sur la culture de salade en aéroponie.

Durant la séparation de l'urine avec les eaux usées, le stockage et les transports, l'urine peut être sujette à de nombreux processus spontanés faisant changer sa composition : l'urée est dégradée par l'uréase en ammonium et en eau, ce qui peut augmenter le pH d'une valeur avoisinant 9 unités (Udert et al. 2003). C'est pourquoi la fabrication de l'urine en tant que fertilisant organique doit suivre quelques processus, d'hygiénisation en outre, aussi bien pour préserver ses effets bénéfiques sur les cultures que prévenir les effets négatifs des micropolluants par volatilisation. L'urine fabriquée par Toopi-organics, elle, est traitée en deux étapes. La première est une acidification consistant en l'ajout d'un acide organique. La deuxième étape correspond à une fermentation par des bactéries d'intérêt agronomique : ce sont des bactéries lactiques qui sont aussi des symbiotes racinaires des plantes. En effet,

Tableau 1 : Tableau récapitulatif du dispositif expérimental et des fertilisants utilisés / Summary table of the used fertilizers (Source : Auteur)

Tour	1	2	3	4	5	6
Fertilisant	Maxigro	Biosevia	Thé de compost	Biosevia + thé de compost	Digestat	Urine
Nature	Minéral (témoin)	Organique	Organique	Organique	Organique	Organique
Forme	Solide	Liquide	Liquide	Liquide	Liquide	Liquide
Fournisseur	GHE	GHE	Les Alchimistes	GHE – Les Alchimistes	Zoo de Beauval	Toopi-organics

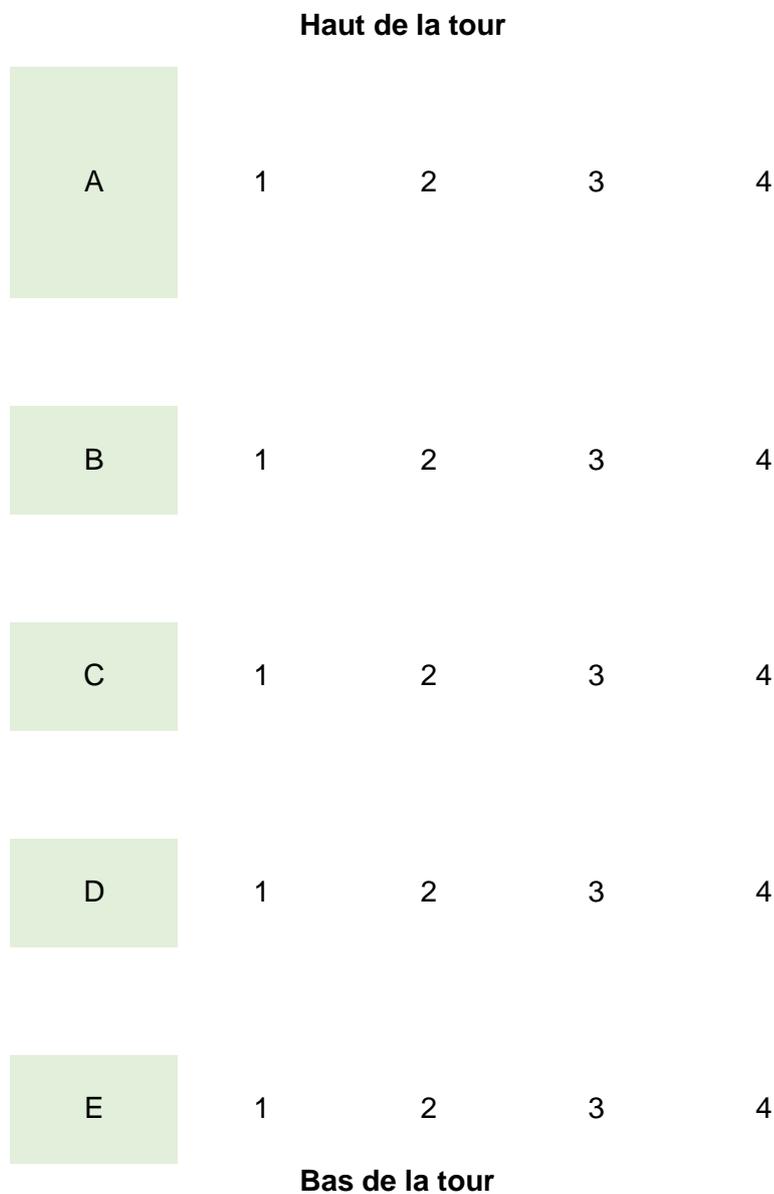


Figure 3 : Schéma d'une tour à plat / Scheme of a tower as a plan (Source : Auteur)

Lactobascillus sp facilite l'absorption des nutriments et de l'eau par les végétaux (Toopi Organics s. d.). Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** résume les fertilisants testés, leur prévenance et leur nature.

2. Méthodes

2.1. Mise en place de l'expérimentation

Les tours expérimentales étaient positionnées en arc de cercle à une extrémité du toit, afin qu'elles reçoivent toutes la même exposition au cours de la journée (Annexe VI : Plan du toit de Cuisine Mode d'Emploi(s), 3-5 Rue Albert Marquet 75020 Paris). Bien que l'expérimentation se focalise sur une culture de salade qui nécessite un minimum d'ombrage, la mise en culture a tout de même été lancée le 21 juillet 2020 sur un toit exposé toute la journée et sans ombrage. En effet, l'enjeu de l'expérimentation se concentrait sur la possibilité ou non de cultiver sur ce toit en particulier, pour s'inscrire dans une économie circulaire en partenariat avec l'école de cuisine qui se situait deux étages plus bas. La durée de l'expérimentation a donc été de quatre semaines, elle s'est terminée le 14 août 2020.

Afin de différencier chaque plan, un système de code a été établi (Figure 3) : les tours étaient numérotées de 1 à 6, comme expliqué précédemment. Chaque étage correspondait à une lettre : l'étage le plus haut au A, et ainsi de suite jusqu'à l'étage le plus bas, E. Ensuite, les plants étaient numérotés de 1 à 5 par étage. Des étiquettes ont été placées sous chaque plant pour bien les identifier.

2.2. Méthode mise en place pour répondre à la problématique principale

La méthode mise en place a été la suivante : stabilisation de la solution nutritive (mesure fréquente de pH, EC et température de l'eau), mesures des données en cours d'expérimentation pour établir un suivi de la croissance des salades d'une part, et à la fin de l'expérimentation pour ajouter des éléments de comparaison d'autre part. Le taux d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) dans chaque fertilisant a également été calculé afin de pouvoir comparer de manière agronomique les fertilisants entre eux. Enfin, une analyse statistique des données permettra de valider ou non les hypothèses posées en début d'expérimentation et de comparer de manière significative l'efficacité des fertilisants, au moyen de modèles ou de représentations graphiques.

2.2.1. Stabilisation de la solution nutritive selon les besoins physiologiques de la salade

La stabilisation de la solution nutritive est un élément très important dans la culture en biojonie (General Hydroponics Europe s. d.). Les caractéristiques de la solution nutritive observées et ajustées sont les suivantes : le pH, l'EC et la température. En effet, les besoins physiologiques de la salade à respecter sont les suivants :

- pH : valeur à maintenir entre 5.5 – 6.5 (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017), pouvant aller jusqu'à 7.5 (Mason 1996).

- EC : pour la variété des quatre saisons, une EC relativement basse est conseillée (entre 0.8 et 1.2 mS/cm) (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017) et doit surtout rester stable (Mason 1996). Des pics d'EC trop forts ou trop faibles (respectivement inférieurs à 0.8 et supérieurs à 1.2 mS/cm) peuvent impliquer une croissance irrégulière. De plus,

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des données initiales d'EC, pH et température de l'eau pour chaque tour, avant le premier ajout de fertilisant / Summary table of initial EC, pH and water temperature data for each tower, before the first fertilizer addition (Source : Auteur)

Tour	1	2	3	4	5	6
EC (μ S)	679	684	686	684	696	695
pH	8,3	8,4	8	8,3	8,3	8,3
Température	23,4	23	22,8	22,8	22 ,8	22,7

des pics d'EC trop forts causeraient des chutes de rendements, d'où l'importance de stabiliser l'EC entre 0.8 et 1.2 mS/cm (Sublett, Barickman, et Sams 2018).

- Température de l'eau : les températures optimales de la salade diffèrent selon les sources, mais restent relativement cohérentes. En effet, elles se situent entre 12 et 20°C (Mason 1996), 18-21°C (General Hydroponics Europe s. d.) ou encore 15-25°C (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017). L'idéal serait donc de ne pas dépasser une température de la solution de 25°C.
- Température de l'air : elle peut monter jusqu'à 24°C sans avoir d'effets négatifs, mais combinée à un ensoleillement de plus de 13h, elle mène à une montaison prématurée au-delà (Sublett, Barickman, et Sams 2018).

La stabilisation de l'EC peut se faire par ajout d'eau et/ou de fertilisant (Benton Jones 2014) : si la perte d'eau observée est non remplacée, l'EC de la solution augmentera rapidement et sa stabilité pourtant requise pour la culture de salade ne sera pas respectée. Il s'agit donc d'ajuster le niveau d'eau régulièrement pour le maintenir à 60L. De plus, la stabilisation de l'EC peut également se faire par ajout de fertilisant : quand sa valeur est trop faible, cela signifie que trop peu d'ions sont encore présents et qu'il faut compenser les prélèvements de la plante en nutriments par l'ajout d'engrais. Il est en revanche important de spécifier que ce système de gestion de l'EC ne prend pas en compte l'absorption individuelle des nutriments au niveau des racines : l'ajustement des fertilisants en fonction de la valeur de l'EC est donc susceptible de ne pas reconstituer pleinement la solution nutritive en termes de quantité d'éléments majeurs (N, P et K). Seulement, pour rajouter ces éléments majeurs en quantités exactes selon les besoins physiologiques de la salade, des appareils de mesure beaucoup plus précis seraient requis, et n'étaient pas ici à disposition. Les ajouts de fertilisants ont été effectués en fonction de la valeur de l'EC, de manière à la maintenir entre 0.8 et 1.2 mS/cm, ce qui reste tout de même un bon indicateur de l'état de la solution nutritive.

La stabilisation du pH, quant à elle, est plus compliquée à obtenir en bioaponie qu'en hydroponie car les réglementations arbitraires proscrirent l'usage de certains stabilisateurs très efficaces. Le pH de la solution nutritive a donc tendance à augmenter et n'aurait pas d'influence fatale jusqu'à une valeur de 7.5 en bioaponie. Au-delà, il est conseillé de le diminuer en utilisant un régulateur de pH : du pH down de la marque GHE a été utilisé ici, mais son utilisation reste à modérer de manière à faire un compromis entre le pH optimal des salades en bioaponie et celui des bactéries présentes dans le biofiltre. En effet, les bactéries *Pseudomonas* et *Bacillus* présentes dans les solutions nutritives en bioaponie ont un pH optimal à prendre également en compte pour ne pas perturber leur environnement. Pour prendre un exemple concret, *Pseudomonas putida* est une bactérie saprophyte présente en bioaponie qui colonise les racines et développe ses pics d'activités de catalases à des pH de 8 et 11 (Katsuwon et Anderson 1992). Une baisse de pH trop importante entrainerait une baisse de l'activité d'une grande quantité de micro-organismes : tout comme l'EC, le pH est donc une valeur à maintenir stable et toute variation brusque reste à proscrire.

Les données de pH, EC et température de l'eau ont été relevées au début de l'expérimentation dans chaque tour remplie à 60L d'eau (

Tableau 2). De cette manière, les premières doses de fertilisants ont été appliquées au fur et à mesure, empiriquement en fonction de la valeur d'EC voulue, en ajoutant le fertilisant progressivement et laissant la valeur d'EC évoluer entre chaque ajout (« Champignons et bactéries bénéfiques » 2014). Puis, les valeurs de pH, EC et température de l'eau ont été mesurées trois fois par semaine, toujours à

la même période de la journée (le matin), après avoir remis le niveau d'eau à jour si nécessaire. Des graphiques traçant les évolutions des valeurs de pH, EC et température de l'eau ont été tracés pour vérifier ou non la stabilité recherchée de ces trois paramètres, en indiquant les valeurs seuil à ne pas dépasser selon les besoins physiologiques de la salade. Les barres d'erreur correspondent à incertitudes liées à la précision de l'appareil de mesure (notée s) : c'est une incertitude de type b, donnée par le constructeur. Elle s'écrit $s = \frac{c}{\sqrt{3}}$ (AC-orléans-tours, s. d.) avec c l'indication du constructeur. Pour la sonde, $c=0.1$.

2.2.2. Mesures des paramètres adaptés pour évaluer l'efficacité des fertilisants

Pour évaluer l'efficacité des fertilisants sur une culture de salade, il est intéressant de se pencher sur les indicateurs caractérisant la croissance des salades (Sublett, Barickman, et Sams 2018) : le rendement, la masse fraîche à la récolte par tour, le diamètre de la tige, le rapport de la masse sèche sur la masse fraîche des feuilles et des racines. La qualité des salades reste également intéressante à évaluer (taux de montaison), ainsi que la surface foliaire et le taux de croissance relatif. En effet, ce dernier correspond à une analyse classique de croissance des plantes (Hoffmann et Poorter 2002) et peut être déterminant dans la comparaison des fertilisants.

En revanche, le système aéroponique est assez contraignant pour effectuer des mesures de suivi, car beaucoup de mesures impliqueraient des pertes d'au moins un plant par tour (comme le suivi du rapport de la masse sèche des feuilles sur leur masse fraîche). En effet, lorsque le plant est installé dans un panier et maintenu par les billes d'argiles, les racines se développent très vite et il devient impossible d'isoler le plant en pleine culture sans le retirer définitivement du système. Or, chaque tour ne comportait que vingt plants, il a donc été choisi de privilégier des méthodes non destructives : la mesure de la surface foliaire au cours du temps, du taux de montaison et de mortalité qui n'impliquaient aucune perte. Les mesures de taille racinaire, du taux de croissance relatif et de masse récoltée ont été effectuées à la fin de l'expérimentation, lorsque les plants pouvaient être désolidarisés du système aéroponique.

La dernière mesure qui devait être réalisée correspondait au taux d'accumulation de N, P et K dans les feuilles. En effet, une mesure de la concentration au début et une à la fin de l'expérimentation aurait permis d'élaborer le taux d'accumulation dans les feuilles de salades par tour et aurait constitué un élément de comparaison intéressant à analyser. Malheureusement, un contact a été pris avec Aurea (laboratoire d'analyse et conseil agroenvironnement), mais bien qu'il ait été anticipé, les délais étaient extrêmement rallongés avec la situation liée au Covid-19 et l'arrivée de l'été. Cette mesure n'a donc pas été effectuée.

Enfin, les concentrations de N, P et K dans chaque fertilisant ont enfin été déterminées : pour les fertilisants commerciaux, elles ont été calculées grâce aux taux indiqués sur les étiquettes, et un échantillon de chaque autre fertilisant organique a été envoyé à Aurea en début d'expérimentation pour déterminer la concentration de chaque élément.

2.2.2.1. Suivi de la croissance des salades : la surface foliaire

La surface foliaire est un paramètre très souvent utilisé pour évaluer la qualité d'une culture. En effet, c'est un outil facile, peu coûteux et non destructif utilisé dans de nombreuses études agronomiques et physiologiques (Pandey et Singh 2011). D'autant plus que la salade

est un produit agricole se caractérisant principalement par la qualité de ses feuilles (couleur, goût, aspect et taille).

La surface foliaire a été élaborée de la manière suivante : elle a été calculée grâce à l'élaboration du coefficient de forme. En effet, c'est une des méthodes les plus simples (Ruguet, Bonhomme, et Chartier 1996) : la surface foliaire d'une feuille peut s'écrire comme le produit de la longueur maximale, par la largeur maximale, par le coefficient de forme, noté s (Vear et al. 2010). Ce dernier n'étant pas connu pour notre variété de salade, il a été nécessaire de le calculer selon la méthode suivante (Ruguet, Bonhomme, et Chartier 1996) : des photographies des certaines feuilles marquées ont été analysées sur Image J et constituaient la valeur de référence. Cette surface foliaire a été comparée au produit $L_{max} * l_{max}$ calculé au préalable pour chacune de ces mêmes feuilles : le coefficient de forme a donc été obtenu en calculant la moyenne des coefficients de forme pondérée par la surface de référence des feuilles de salade.

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \frac{\sum * s * Lmax * lmax}{\sum * Lmax * lmax}$$

Ici, $n=30$ plantes (5 plants par tour). Ainsi, le coefficient retenu correspond à 0.879. A titre de comparaison, le coefficient de forme a une valeur de 0.749 sur un échantillon de 30 plantes de maïs (Prevot, Aries, et Monestiez 1991), et il a été choisi ici de déterminer le coefficient de forme de manière empirique pour rester s'adapter le plus possible à la forme des feuilles de laitue. La surface a donc été relevée tous les mardis de chaque semaine, pendant toute la durée de l'expérimentation (4 semaines) et pour tous les plants (600 mesures en tout).

2.2.2.2. Des mesures effectuées en fin d'expérimentation

Les autres mesures effectuées ne représentent pas d'évolution dans le temps comme la surface foliaire, mais sont plutôt des valeurs obtenues en fin d'expérimentation, comme le taux de montaison, de mortalité, le taux de croissance relatif ou encore la masse récoltée.

- Taux de croissance relatif

Le taux de croissance relatif r fait partie des principaux facteurs affectant la disponibilité et la demande en nutriments (Scaife 1973), puisque la composition en nutriments des plantes reste idéalement constante tout au long de la croissance. Sa formule est la suivante (Hoffmann et Poorter 2002) :

$$r = \frac{\ln(W2) - \ln(W1)}{t2 - t1}$$

Avec W_1 et W_2 les masses des salades aux temps t_1 et t_2 respectivement. Ce taux s'exprime en $g.g^{-1}.j^{-1}$.

Ici, t_1 correspond à la masse de la salade au commencement de l'expérimentation, lorsque aucun fertilisant n'avait été ajouté : assez de plants supplémentaires étaient disponibles, ce qui a permis de ne pas sacrifier un plant par tour au temps t_1 en mesurant sa masse. Le temps t_2 correspond au moment de la récolte. Les masses des salades $B1$ de chaque tour ont été pesées au temps t_2 : prendre des salades avec les mêmes positionnements sur chaque permettaient d'annuler tout biais. Un taux de croissance relatif a donc ainsi été calculé pour chaque engrais.

- Masse récoltée, rendement et analyse économique

La masse totale de toutes les salades par tour a été pesée en fin d'expérimentation, dans l'idée de calculer ensuite un potentiel rendement (nombre de salade par unité de surface) et de faire une analyse économique : comparer le prix d'un plant de salade avec le prix d'une salade à la récolte, mais aussi calculer la marge effectuée par tour, en incluant le prix de chaque engrais et la consommation d'énergie requise par les systèmes aéroniques.

- Taux de mortalité

Le nombre de plants morts par tour a été relevé par semaine afin de noter le taux de mortalité (en pourcentage) relatif à chaque engrais.

- Taux de montaison

La laitue des quatre saisons est une variété résistante à la montaison (Pépinière des Carlines 2015), c'est pourquoi le nombre de plants ayant monté en graine a été noté pour identifier si un des fertilisants, ou un facteur extérieur, pouvait influencer sur ce paramètre. De plus, au vu des températures en juillet et août à Paris, il est devenu pertinent de noter l'évolution du taux de montaison au cours des semaines. Le but était de les corrélérer ou non à la chaleur estivale et donc en faire un critère commun à toutes les tours (et non un biais).

- Taille racinaire

La qualité d'une culture de salade en aéroponie peut être évaluée en fonction de la taille racinaire des plants. En effet, c'est un indice important de la croissance car elle est favorisée par les systèmes aéroniques (taux d'oxygénation maximal) (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017). Ainsi, la taille racinaire et la masse des salades sont positivement corrélées : plus un plant possède une longueur racinaire élevée, plus sa masse à la récolte sera élevée (Repetto, Cadinu, et Leoni 1994). Il est donc pertinent de regarder la taille racinaire des plants pour chaque tour : puisque la mesure de la taille racinaire pour chaque tour est une méthode destructive en aéroponie, la taille des racines a été mesurée avant mise en place des tours, et à la récolte. C'est donc une différence de taille qui sera analysée pour chaque tour.

2.2.3. Calcul des concentrations apportées en N, P et K

Les concentrations de N, P et K de chaque fertilisant ont pu être calculées grâce :

- Aux étiquettes des fertilisants commerciaux (Annexe I : Composition du Maxigro et Annexe II : Composition du Biosevia) : pour le fertilisant minéral Maxigro, il est indiqué 10 – 5 – 14. Donc 10g d'azote sont présents pour 100g de produit. De manière identique pour le Biosevia, l'étiquette indique 3 – 1 – 6, et des précisions sont apportées : 3.93% d'azote total, 1.95% de phosphore et 6% de potassium. Pour un engrais liquide, cela signifie qu'il y a 3,93g d'azote total pour 100 mL de fluide. Les concentrations en g/L ont été calculées de la sorte.
- Des échantillons de chaque fertilisant dont la composition n'était pas exactement connue ont été envoyés à la société Aurea, pour obtenir les taux précis en N, P et K (Annexe III : Composition du thé de compost, Annexe IV : Composition du digestat de méthanisation, Annexe V : Composition de Bactipi).

Une fois les proportions de N, P et K obtenues par type de fertilisant, leur concentration apportée dans chaque cuve a été calculée en fonction de la quantité hebdomadaire de fertilisant rajoutée. Il est important de noter que c'est la concentration apportée en éléments

majeurs, et non celle biodisponible ou encore celle assimilée par la plante. Il s'agit ici de vérifier s'il est possible de mettre en relation la variation de la concentration apportée en éléments majeurs, avec la qualité des salades.

Toutes les valeurs mesurées ont été résumées dans l'**annex**

2.3. Analyses statistiques

L'objectif de l'expérimentation est le suivant : déterminer dans quelles mesures un fertilisant organique, provenant de la réutilisation de biodéchets en milieu urbain, peut être aussi performant qu'un fertilisant minéral commercial.

Comme expliqué précédemment, l'efficacité des fertilisants sera évaluée grâce au suivi de la croissance des plants de salade : on s'intéressera donc à la surface foliaire d'une part, et à l'augmentation de la taille racinaire d'autre part. Les données telles que le taux de croissance relatif, la masse récoltée, le taux de mortalité ou encore le taux de montaison seront traités à part, en représentations graphiques principalement. Pour cela, plusieurs tableaux différents ont été construits.

2.3.1. Description des jeux de données

Le premier tableau contient 120 lignes et 3 colonnes. Les 120 lignes correspondent aux 20 données par tour. Les trois colonnes correspondent à la variable quantitative et aux deux variables qualitatives suivantes respectivement : taille racinaire, numéro du plant et type de fertilisant.

Le deuxième tableau contient 480 lignes et 4 colonnes. Les lignes correspondent aux 20 données par tour par semaine (6 tours et 4 semaines). Les 4 colonnes correspondent aux trois variables qualitatives et à une seule variable quantitative, respectivement : numéro de la semaine, numéro du plant, type de fertilisant, et valeur de la surface foliaire (relevés faits par plants, par tour et par semaine). Un exemple de chaque jeu de donnée est disponible en annexe (

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4
pH	xxx	xxx	xxx	xxx
EC	xxx	xxx	xxx	xxx
T_eau	xxx	xxx	xxx	xxx
Taille racinaire	x			x
Surface foliaire	x	x	x	x
RGR				x
Masse				x
Taux de mortalité				x

Taux de
montaison

x

x

x

x

Annexe VIII : Exemple des deux premiers jeux de données)

2.3.2. Modèles appliqués grâce au logiciel R

- Premier tableau : influence des types de fertilisants sur l'augmentation de la taille racinaire

Dans ce premier tableau, c'est l'influence du type de fertilisant sur la taille racinaire qui est étudiée. Il est important de re-préciser que ce sont les différences de tailles racinaires entre le début et la fin de l'expérimentation qui sont observées. Pour cela, le modèle avec une variable qualitative à six modalités (une pour chaque type de fertilisant) est le suivant :

$$Y_i = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Y_i représente la différence de taille racinaire entre le début et la fin de l'expérimentation, μ la moyenne des différences de tailles racinaires pour le fertilisant témoin minéral et α_i le type de fertilisant (i allant de 1 à 6). ε_{ij} correspond aux résidus du modèle, dont il faudra vérifier la normalité. L'hypothèse H_0 à vérifier est la suivante : $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$. Ainsi, c'est l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas d'effet de α_i sur Y_i , c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'effet du

Tableau 3 : Données analysées sur Excel / Excel analyse of data (Source : Auteur)

Tour	Type de fertilisant	RGR (g/g/j)	Masse récoltée (g)	Mortalité (%)
1	FM	0,1245563	400	0
2	FO	0,18713326	900	0
3	FOC	0,10200305	500	0
4	FOB+C	0,1905229	1500	0
5	FOD	0,11774131	550	0
6	FOU	0,03248758	150	15

type de fertilisant sur l'augmentation de la taille racinaire. L'hypothèse H_1 est donc la suivante : il existe au moins un couple (i, i') avec $i \neq i'$, pour lequel $\mu_i \neq \mu_{i'}$. C'est-à-dire, il existe au moins un type de fertilisant pour lequel une valeur de l'augmentation de taille racinaire est significativement différente des autres.

- Deuxième tableau : influence du type de fertilisant sur la surface foliaire et représentation de la surface foliaire au cours du temps

Dans un premier temps, c'est l'influence du type de fertilisant sur l'augmentation de la surface foliaire qui est étudiée, sans interaction avec le temps. C'est donc la moyenne de la surface foliaire pour les quatre semaines qui sera prise en compte. De la même façon que pour l'interaction de la taille racinaire avec le type de fertilisant, un modèle avec une variable qualitative à six modalités (une par type de fertilisant) est créé :

$$Y_i = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Y_i représente la surface foliaire, μ la moyenne des surfaces foliaires pour le fertilisant témoin et α_i le type de fertilisant (i allant de 1 à 6). ε_{ij} correspond aux résidus, dont la normalité sera également à vérifier. L'hypothèse H_0 est la suivante : $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'effet du type de fertilisant sur la surface foliaire. Ainsi, l'hypothèse H_1 est la suivante : il existe au moins un couple (i, i') avec $i \neq i'$, pour lequel $\mu_i \neq \mu_{i'}$.

Dans un second temps, la surface foliaire a été tracée au cours du temps pour chaque fertilisant. En effet, puisque la croissance de la surface foliaire peut être modélisée de manière exponentielle (Jung et al. 2016), il est intéressant de vérifier si elle respecte bien ce modèle pour chaque fertilisant. Il s'agira de visualiser quel fertilisant permet la croissance la plus rapide et la plus élevée. Pour cela, le modèle suivant a été réalisé :

$$Y_{ij} = \mu + \exp(\alpha_i) + \varepsilon_{ij}$$

Avec Y_{ij} la surface foliaire du plant i pour la semaine j , μ la moyenne des surfaces foliaires pour le fertilisant concerné et α_i la semaine (i allant de 1 à 4). ε_{ij} correspond aux résidus du modèle. Ce modèle a été appliqué à chaque engrais séparément : il s'agit d'une représentation graphique et non d'un test statistique.

2.3.3. Troisième tableau : traitement des données avec Excel

Ce dernier tableau possède 6 modalités en lignes et 5 en colonnes (Tableau 3) : il concerne les valeurs mesurées à la fin de l'expérimentation pour chaque tour, à savoir le taux de croissance relatif (Relative Growth Rate), le taux de mortalité et la masse récoltée. Le taux de montaison a été relevé par semaine, afin de pouvoir noter une évolution de la qualité des salades, à relier ou non à la température de l'eau et celle extérieure. Des histogrammes ont été tracés pour chacun de ces paramètres afin de comparer leur valeur, d'un fertilisant à un autre. Enfin, les barres d'erreur ajoutées correspondent aux incertitudes liées à l'indication du constructeur : pour la balance de précision, $c=0.1$ g et pour la balance de cuisine, $c=100$ g. La formule est la même que pour l'incertitude du pH, EC et température de l'eau.

3. Résultats

Les résultats seront abordés de la manière suivante : des photos des tours seront mises à disposition afin de donner un aspect visuel à l'expérimentation, comme premier aperçu du

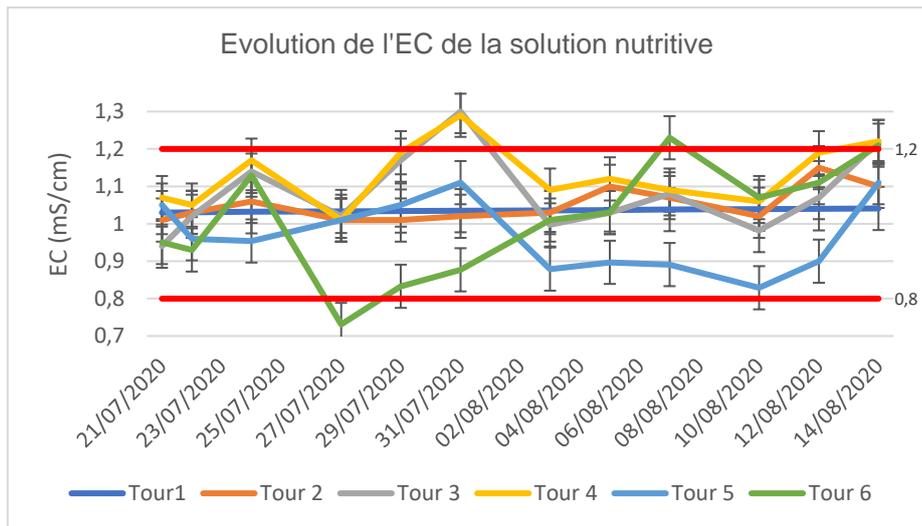


Figure 4 : Graphique représentant l'évolution de l'EC dans la solution nutritive / Graph of the evolution of EC into the nutrient solution (Source : Auteur)

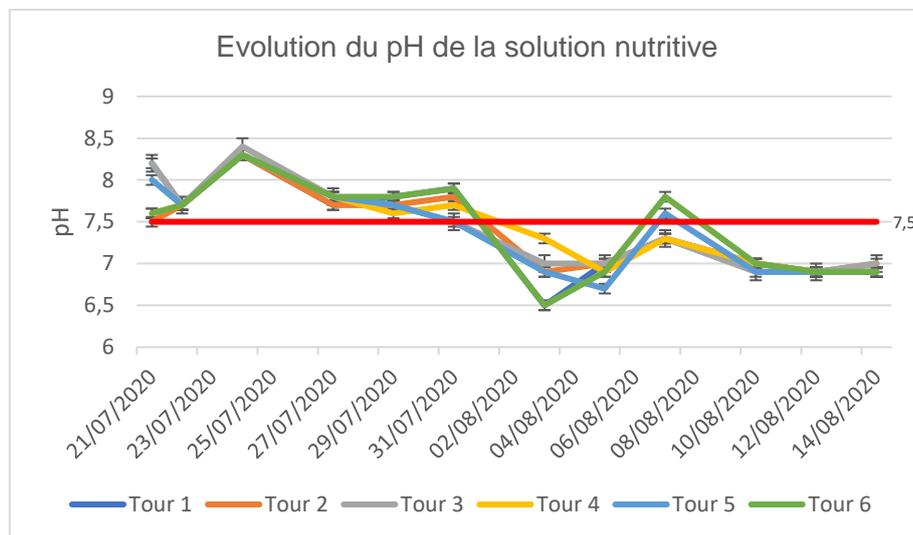


Figure 5 : Graphique représentant l'évolution du pH dans la solution nutritive / Graph of evolution of pH into the nutrient solution (Source : Auteur)

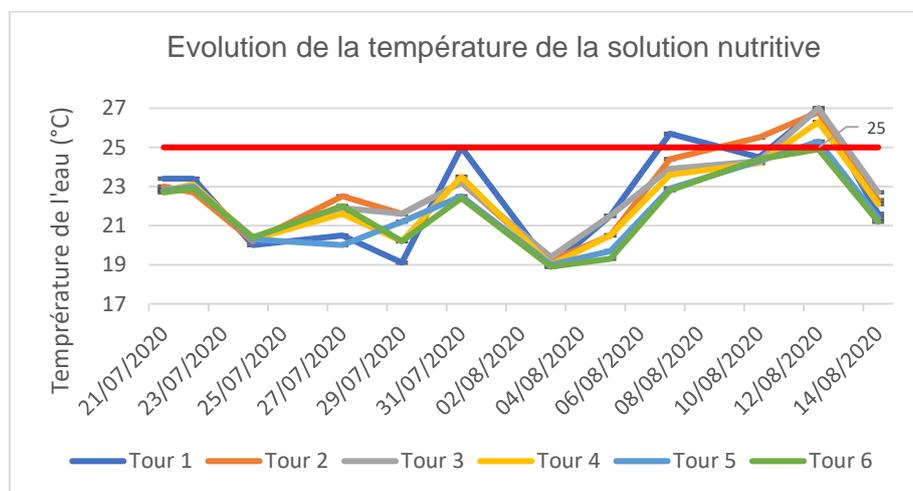


Figure 6 : Graphique représentant l'évolution de la température de l'eau dans la solution nutritive / Graph of the evolution of nutrient solution temperature (Source : Auteur)

résultat. Les variations de pH, EC et température de l'eau seront ensuite étudiées et leur stabilité analysée ; les graphiques excel présentant pour chaque tour les valeurs du taux de croissance relatif, de la masse récoltée, du taux de mortalité et de montaison donneront un autre aperçu de la tendance des résultats. Enfin, l'analyse se portera sur les paramètres de croissance selon l'ordre suivant : taille racinaire puis surface foliaire.

3.1. Analyse visuelle : évolution de l'aspect des tours au cours du temps

En se référant aux photos montrant l'évolution de l'aspect visuel (Annexe IX : Evolution de l'aspect visuel des salades), presque aucune différence ne peut être faite jusqu'à la semaine 2 comprise. En effet, les tours semblent toutes évoluer de la même manière. En revanche, à partir de la troisième semaine, la densité des plants se différencie en fonction des tours : la tour à base d'urine apparaît beaucoup moins fournie que les autres, et la tour combinant la Biosevia et le thé de compost commence à se démarquer positivement. Cette impression peut être vérifiée par les photos de la semaines 3 prises de plus près. Enfin, à la semaine 4, les salades de cette dernière apparaissent comme étant les plus développées, suivie de la tour à base de Biosevia seul. Les autres tours semblent être au même stade à la fin de l'expérimentation, tandis que la tour à base d'urine est bien démarquée négativement par rapport aux autres.

3.2. Variation de pH, EC et température de l'eau

Les graphiques obtenus sont représentés dans les figures ci-contre. Comme précisé précédemment, le pH et l'EC sont des paramètres assez difficiles à maintenir stables en bioponie : les seuils établis selon les besoins physiologiques de la laitue ont été tracés. Une valeur de 7,5 pour le pH avait été prédéfinie en amont, et l'intervalle 0.8 – 1.2 mS/cm apparaît aussi pour l'EC.

Le graphique représentant l'évolution de l'EC (Figure 4) présente des barres d'erreur qui se chevauchent en grande partie. En effet, l'appareil de mesure étant précis à 0.1 mS/cm près, il est possible d'affirmer que l'EC est restée globalement constante durant toute la durée de l'expérimentation, et surtout entre les valeurs seuil de 0.8 mS/cm et 1.2 mS/cm. Cependant, une chute dans la valeur de l'EC de la tour à base d'urine se profile aux alentours du 27 juillet. En effet, la valeur tombe à 0.7 mS/cm tandis qu'elle approchait 1 mS/cm deux jours avant : les barres d'erreur ne se chevauchent pas, la variation brusque est donc significative. De manière plus tardive, une chute similaire bien que moins prononcée apparaît à partir du 4 août pour la tour à base de digestat : les valeurs basses (ne dépassant pas 0.8 mS/cm) sont elles aussi significativement différentes de la valeur précédente, de 1.1 mS/cm. Ces deux variations d'EC concernant les tours aux fertilisants à base d'urine et de digestat peuvent être expliquées par des délais très importants de livraison de ces deux fertilisants, suite aux conditions actuelles. A l'inverse, une hausse significative de l'EC concernant la tour de Maxigro apparaît à deux dates : les 25 et 29 juillet.

Le graphique du pH en fonction du temps (Figure 5) semble traduire la même tendance de variation pour toutes les tours : un départ aux alentours de 8, et une baisse progressive pour atteindre la valeur de 7 en fin d'expérimentation. Contrairement aux barres d'erreur de l'EC, celle des valeurs de pH ne se chevauchent que rarement : les variations sont belles et bien

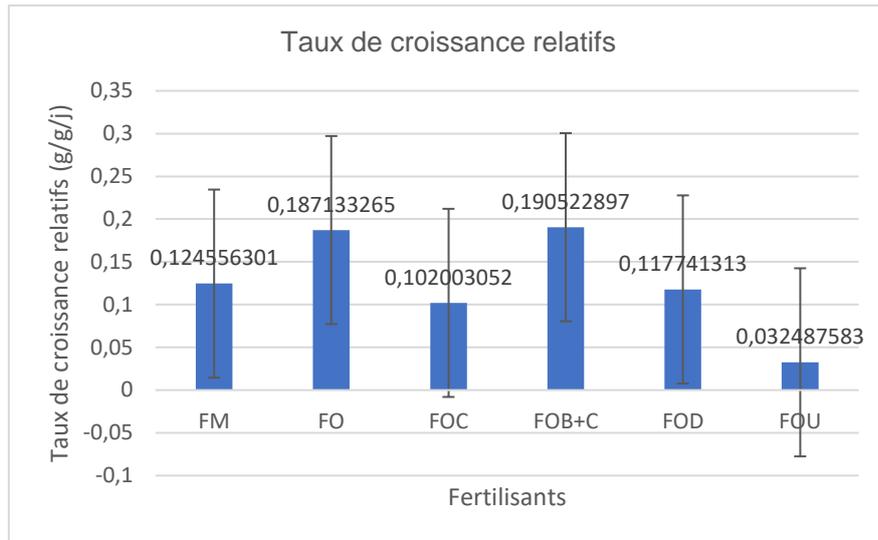


Figure 7 : Histogramme comparant les valeurs des taux de croissance relatifs en fonction des fertilisants / Histogram comparing values of the relative growth rate as a function of fertilizers (Source : Auteur)

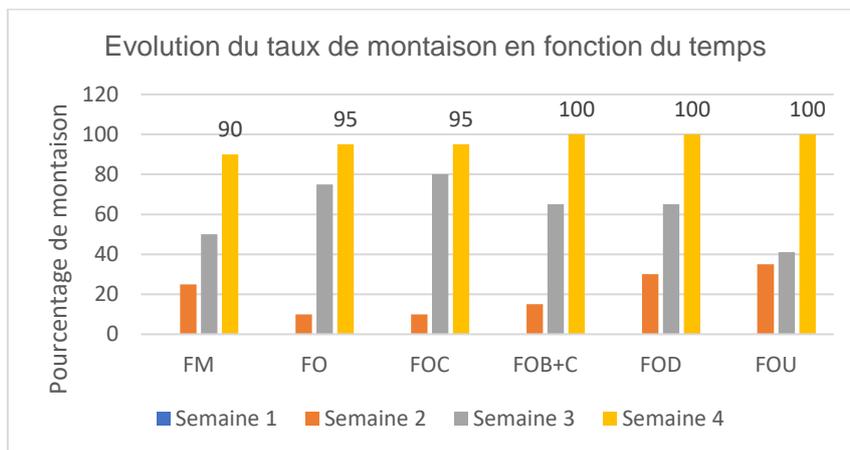


Figure 8 : Histogramme représentant l'évolution du taux de montaison pour chaque fertilisant / Histogram representing the evolution of the bolting rate for each fertilizer (Source : Auteur)

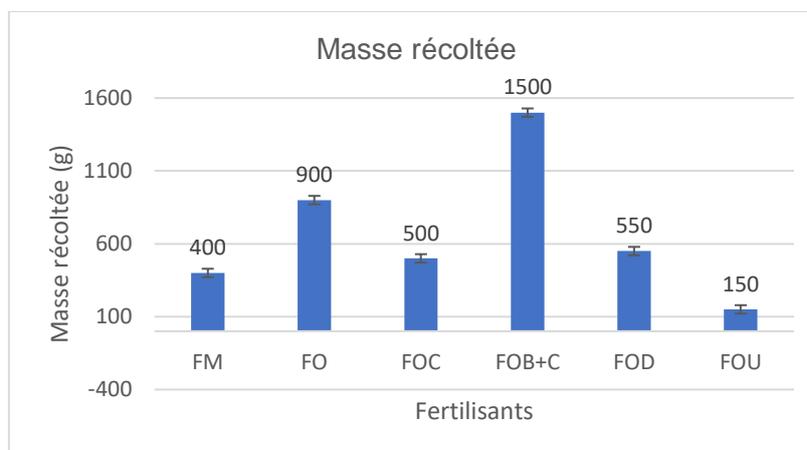


Figure 9 : Histogramme représentant les masses récoltées pour chaque tour / Histogram representing the weight of all salads per Tower (Source : Auteur)

significatives mais restent aux alentours d'une valeur de 7.5, malgré les hautes valeurs du début.

Enfin, les variations de la température de la solution nutritive représentées par le dernier graphique (Figure 6) se montrent assez similaires entre les tours. Les températures passent progressivement le seuil de 25°C pour l'atteindre toutes le 12 août. Evidemment, ces variations de températures de la solution nutritive sont à relier à celle de la température ambiante : elle a considérablement augmenté durant le mois d'août 2020 (Annexe X : Evolution de la température extérieure maximale durant toute l'expérimentation). Les températures maximales ont été tracées en fonction des valeurs relevées par la station météorologique de Paris-Montsouris (« Infoclimat - la météo en temps réel : observations météo en direct, prévisions, archives climatologiques, photos et vidéos... » s. d.) : en comparant les deux graphiques, les pics de températures apparaissent aux mêmes dates (31 juillet et 12 août).

3.3. Taux de croissance relatif

Les taux de croissance relatifs obtenus pour chaque tour ont été représentés dans l'histogramme ci-contre (Figure 7). Les barres d'erreur sont d'une valeur de $0.115 \text{ g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ calculée selon la méthode de l'incertitude de type b : cette valeur apparaît très importante comparée aux valeurs des taux de croissance en eux-mêmes. Il aurait été préférable d'avoir un appareil de mesure plus précis qu'à 0.1g près. Il est toutes fois possible de remarquer une tendance même si les résultats ne sont pas significatifs : les tours de Biosevia et biosevia/thé de compost semblent impliquer des taux de croissance relatifs plus élevés que les autres ($0.187 \text{ g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ et $0.19 \text{ g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ respectivement), tandis que les salades de la tour à base d'urine ont un taux très bas ($0.03 \text{ g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$). Ces résultats n'étant pas significatifs, ils ne permettent pas de différencier les performances de chacun des fertilisants : ils ne seront donc pas discutés par la suite.

3.4. Taux de montaison : l'évolution par semaine

La variation du taux de montaison a été représentée en fonction du temps (Figure 8) : le taux de montaison a considérablement augmenté entre la semaine 2 et 3 pour les tours n°1 à 5. En revanche, il augmente déjà beaucoup plus pour la tour à base d'urine dès la semaine 2. A la fin de la semaine 4, il est au moins égal à 90% pour toutes les tours : les tours n°4, 5 et 6 ont un taux de montaison à 100%, tandis qu'il est à 95% pour les tours n°2 et 3 et 90% pour la tour 1. Il n'est donc pas incorrect de le considérer comme un biais sans grande importance pour l'expérience : en effet, presque toutes les salades sont montées en graine quel que soit le type de fertilisant. La masse fraîche récoltée par tour correspond donc à la masse de toutes les salades, montées en graine ou non. Une relation sera donc à établir dans la discussion avec la température de l'air, puisqu'une température extérieure de plus de 24°C combinée à plus de 13h d'ensoleillement mènent à une montée en graine prématurée (Sublett, Barickman, et Sams 2018) (Cometti et al. 2013). Pour finir, bien qu'il soit un critère très intéressant à évaluer pour relever la qualité d'une culture, le rendement ne sera pas analysé ici, puisqu'aucune des salades récoltées n'est comestible.

Tableau 4 : Concentration des différents fertilisants en éléments majeurs / Major element nutrient concentrations for each fertilizer (Source : Auteur)

Fertilisant	Type	N	P	K
Maxigro	Minéral	100 g/kg	5 g/kg	14 g/kg
Biosevia	Organique	39,3 g/L	19,5 g/L	60 g/L
Thé de compost	Organique	1,06 g/L	0,054 g/L	1,73 g/L
Digestat de méthanisation	Organique	3,6 g/L	1,5 g/L	3,5 g/L
Urine	Organique	3,05 g/L	0,210 g/L	0,6 g/L

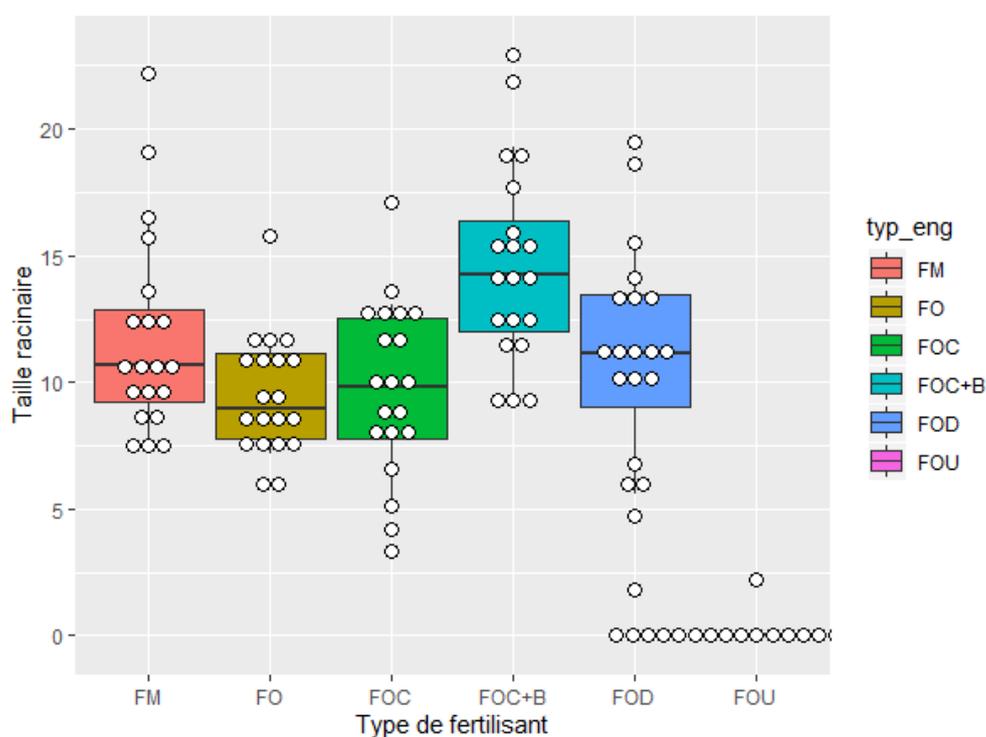


Figure 10 : Diagramme en boîte représentant l'augmentation de taille racinaire en fonction des fertilisants / Box plot representing the increase of root length according to each fertilizer (Source : Auteur)

3.5. Masse fraîche à la récolte

La masse fraîche de chaque tour apparaît sur un histogramme comportant des barres d'erreur calculées aussi avec l'incertitude de type b (Figure 9). Elles valent donc 57.7g : il est possible de classer les tours en fonction de leur masse récoltée. La tour au traitement simultané de Biosevia et de thé de compost a produit une masse fraîche de salade de 1.5 kg tandis que la masse fraîche récoltée pour la tour de Biosevia seul, est de 900g. Les autres tours ont des masses fraîches à la récolte plus ou moins équivalentes, de 400g, 500g et 550g respectivement. Enfin, comme sur d'autres paramètres, la tour à base d'urine se démarque avec une masse récoltée de seulement 150g.

3.6. Taux de mortalité

Le taux de mortalité est nul pour toutes les tours, sauf pour la tour à base d'urine qui a perdu trois plants. C'est encore une fois la tour ayant subi le traitement à l'urine qui semble la moins productive.

3.7. Variation des concentrations ajoutées en N, P et K

Les concentrations des éléments N, P et K présentes dans chaque fertilisant sont résumées dans le Tableau 4. Il est possible de remarquer que les quantités de N, P et K sont extrêmement différentes les unes des autres. L'objectif étant de fixer l'EC, ces concentrations en azote, phosphore et potassium ne seront pas utilisées par la suite : il n'est pas possible, de par la faiblesse de la bibliographie concernant les fertilisants organiques, de quantifier les concentrations d'azote, phosphore et potassium biodisponibles. Les fertilisants ne peuvent donc pas être comparés en fonction de ces quantités en éléments majeurs, mais seulement en fonction de leur capacité à apporter une solution nutritive stable et des bons facteurs de croissance.

3.8. Taille racinaire

Pour s'assurer de la validité du modèle créé entre l'augmentation de taille racinaire et le type de fertilisant, il faut vérifier que les résidus suivent bien une loi normale de paramètres $(0, \sigma)$. La représentation graphique des quantiles du modèle en fonction des quantiles théoriques donne bien une relation est linéaire donc l'hypothèse de normalité est vérifiée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Avec une p-value inférieure à 0.05 (p-value $< 2.2e^{-16}$), H_0 est rejetée : il est donc possible d'affirmer que trois types de fertilisant ont abouti à des salades ayant une augmentation de taille racinaire significativement différente de celle de la tour témoin. En effet, les racines de la tour ayant subi le traitement au fertilisant organique commercial ont grandi de 2.27cm de moins par rapport à la tour témoin ; celles de l'association du thé de compost avec le Biosevia en revanche, ont grandi de 2.88cm de plus que celles de la tour témoin. Enfin les racines des salades ayant poussé grâce au fertilisant à base d'urine ont eu une croissance de 11.65 cm plus petite que celle de la tour témoin sur la totalité de l'expérimentation. La fertilisation ayant permis la taille racinaire la plus élevée est donc l'association Biosevia et thé de compost. L'autre différence significative se joue au niveau de la tour contenant l'urine : c'est dans cette tour que les racines des salades ont le moins bien grandi. De manière à visualiser ces différences de taille racinaire entre type de fertilisant, un diagramme en boîte a également été tracé (Figure 10). On peut remarquer sur celui-ci que

les valeurs sont réparties de manière assez éparées sauf pour la tour à base d'urine, pour laquelle elles sont très basses.

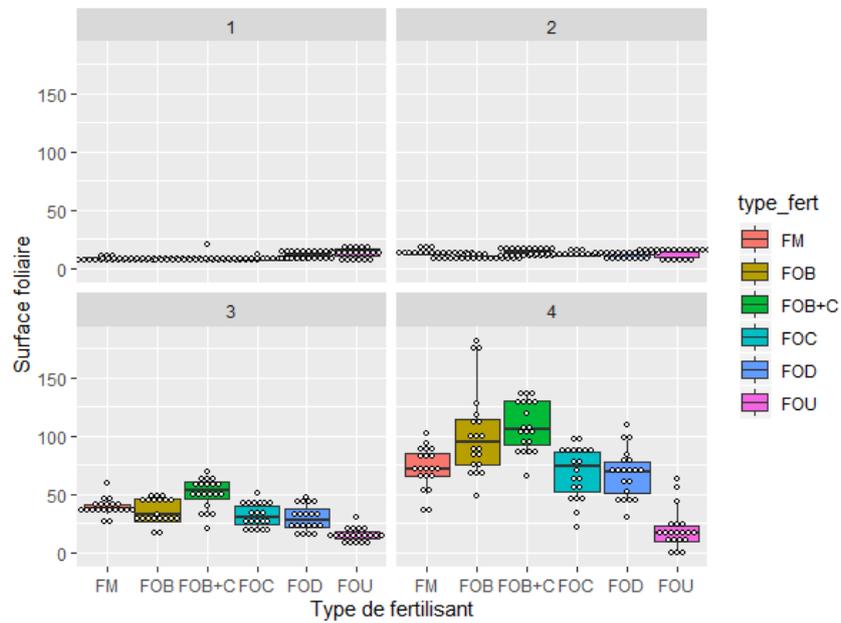


Figure 11 : Diagramme en boîte représentant l'influence du type de fertilisant sur la surface foliaire / Box plot representing the influence of the type of fertilizer on the leaf area (Source : Auteur)

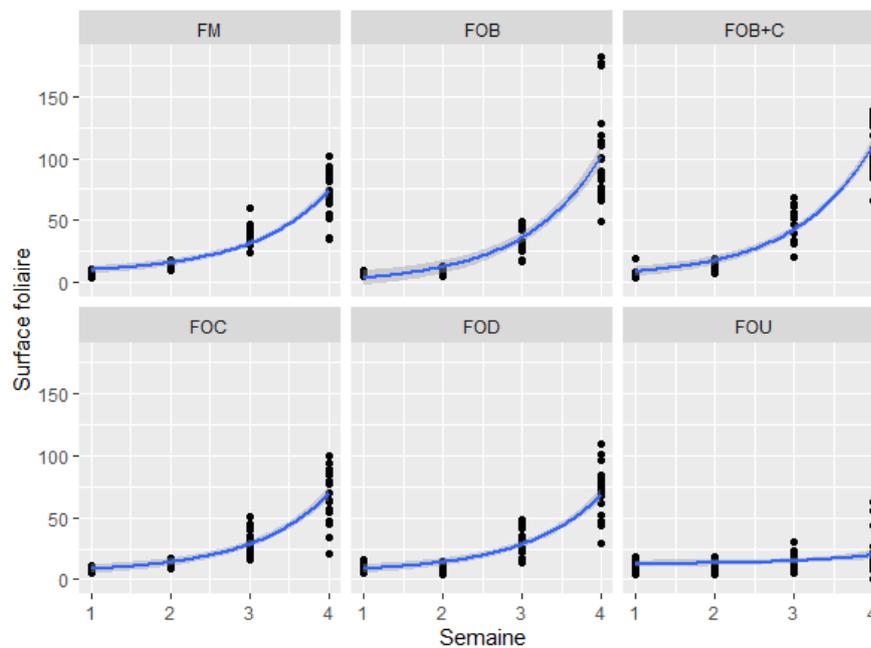


Figure 12 : Représentation exponentielle de la surface foliaire en fonction du temps, par type de fertilisant / Exponential representation of the leaf area along time for each fertilizer (Source : Auteur)

3.9. Surface foliaire

De la même manière que pour la taille racinaire, la représentation graphique des quantiles du modèle en fonction des quantiles théoriques donne bien une relation linéaire donc l'hypothèse de normalité est vérifiée. Avec une p-value inférieure à 0.05 (p-value < 1.587 e⁻¹⁶), H₀ est rejetée : les salades de la tour à base de Biosevia et thé de compost ont une surface foliaire sur les quatre semaines de 12.04 cm² plus grande que celles de la tour témoin. En revanche, les salades de la tour à base d'urine ont une surface foliaire significativement plus petite de 18 cm² que celles de la tour témoin. Les surfaces foliaires des autres tours ne présentent pas de différence significative par rapport au témoin. Avec ces résultats, l'association Biosevia et thé de compost correspond encore à la meilleure option pour optimiser la surface foliaire des salades. Une représentation d'un diagramme en boîte est donnée Figure 11.

La même vérification de la normalité des résidus est appliquée pour la modélisation de la surface foliaire en fonction du temps. Elle suit donc bien un modèle exponentiel pour tous les fertilisants, excepté pour celui à base d'urine (Figure 12). C'est pourquoi ce dernier sera exclu de la courte analyse qui suit. La différence entre les fertilisants peut se faire sur la rapidité de cette croissance foliaire : bien que les courbes aient toutes une allure exponentielle, elles croissent plus ou moins rapidement. En effet, la courbe de croissance la plus performante semble être celle concernant les salades cultivées à base de thé de compost et de Biosevia : cela se vérifie par les valeurs significativement plus élevées pour la surface foliaire de cette même tour, dans le test statistique précédent.

On peut donc conclure de ces résultats que le pH et l'EC de la solution nutritive ont été plus ou moins maintenus stables, sauf pour la tour à base d'urine : leurs variations ont été très importantes et s'expliquent par une pénurie de fertilisant. La température de l'eau a subi de fortes variations dues à la température extérieure. Enfin, d'après les analyses de paramètres de croissance, c'est l'association du thé de compost au Biosevia qui semble être la meilleure fertilisation, et l'urine la moins performante.

4. Interprétation et discussion

Il s'agit dans cette partie de mettre en relation tous les résultats pour expliquer les causes et conséquences de chaque valeurs ou variations relevées, que ce soit pour les paramètres de la solution nutritive ou ceux de la croissance des salades.

4.1. Interactions des facteurs abiotiques entre eux et avec les paramètres de croissance

La culture en bioponie mène à de très nombreuses interactions : des facteurs abiotiques entre eux, comme sur les paramètres physiologiques et de croissance. Les facteurs abiotiques sont définis comme étant des facteurs physico-chimiques ayant une influence sur la biocénose d'un écosystème (Universalis s. d.). Ils sont donc représentés ici par le pH, l'EC, la température de l'eau concernant la solution nutritive, et la température de l'air et l'ensoleillement concernant la partie extérieure du dispositif. L'objectif de l'expérimentation est de différencier les fertilisants testés selon plusieurs domaines (agronomiques, économique, réglementaire) pour définir le plus performant et déterminer ainsi qu'il est possible, dans le cadre d'une culture

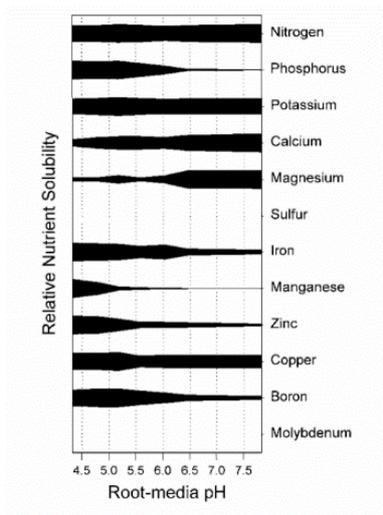


Figure 13 : Biodisponibilité des éléments nutritifs en fonction du pH / Biodisponibility of major elements according to the value of pH (Source : (Argo 2003))

aéroponique, d'obtenir une culture de salade d'aussi bonne qualité avec des fertilisants organiques issus de biodéchets qu'avec des fertilisants minéraux. L'influence des caractéristiques de chaque fertilisant testé est donc primordiale, mais les conditions météorologiques estivales de l'année 2020 ont été si exceptionnelles (fortes chaleurs notamment) que leur analyse devient cruciale pour comprendre les résultats obtenus. Un des objectifs fixés était de maintenir la stabilité de la solution nutritive pour satisfaire les besoins physiologiques de la laitue, et ne pas dépasser de valeur seuil qui serait déterminante dans la croissance de ces dernières. En culture hors sol, les facteurs abiotiques sont très influents sur la qualité des cultures et les variations de pH et d'EC sont continues (Domingues et al. 2012) : en effet, cette dernière interagit avec la température de l'eau (Cometti et al. 2013), mais les changements de la disponibilité des nutriments sont non seulement corrélés à la variation de conductivité de la solution nutritive, mais aussi aux variations de pH (Figure 13) (Cometti et al. 2013). Ces changements dans la disponibilité des nutriments mènent à des variations de l'ouverture des stomates et de la croissance des feuilles. Cela influe donc directement sur la performance photosynthétique de la plante et par conséquent sur la production de masse sèche à la récolte.

La température de l'eau, quant à elle, est premièrement liée à la température de l'air. En effet, aucune voile d'ombrage n'a pu atténuer la sévérité de la chaleur ressentie en août. Le renouvellement de l'eau des cuves pour rafraîchir la température de la solution nutritive n'était pas envisageable, car cela aurait totalement modifié l'environnement de la cuve et perturbé la vie des micro-organismes présents. Par ailleurs, le renouvellement fréquent de l'eau des cuves en aéroponie n'est pas non plus un principe pertinent, car il va à l'encontre de l'un des principaux avantages du système aéroponique, qui est l'économie d'eau grâce au circuit fermé. Dans un second temps, la température de l'eau est aussi liée à l'ensoleillement : le toit sur lequel s'est déroulée l'expérimentation n'a pas un coin d'ombre, et les tours expérimentales ont été exposées au soleil durant les quatre semaines. Les solutions à ces corrélations directes entre température extérieure / ensoleillement et température de la solution nutritive pourraient donc être de cultiver plus tôt dans l'année ou de positionner des voiles d'ombrage. Un aménagement de la zone de culture sur le toit de Cuisine Mode d'emploi(s) est donc ici proposé. Ces variations de pH, EC et température de l'eau maintenant expliquées, il est possible d'établir des relations directes avec les résultats obtenus sur les paramètres de croissance des salades.

Le premier paramètre qui peut s'expliquer est le taux de montaison : en effet, lorsque la température de l'eau dépasse 25°C (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017), ou même 20°C (Cometti et al. 2013), la montée en graine des salades est prématurée. Elle est également accélérée lorsque la température extérieure dépasse 24°C et 13h d'ensoleillement (Sublett, Barickman, et Sams 2018). Ici, ces seuils de températures d'eau et d'air extérieur ont été atteints, ainsi que la durée maximale d'ensoleillement : la montée en graine des salades s'est observée sur toutes les tours, elle s'explique donc par les facteurs abiotiques et non par la qualité des fertilisants en eux-mêmes.

Le deuxième paramètre de croissance pouvant être discuté ici est la surface foliaire. En effet, elle suit bien un modèle exponentiel pour tous les fertilisants organiques, excepté celui à base d'urine. De plus, puisque toutes les tours ont subi les mêmes températures d'air et d'eau extrêmes dues au mois d'août, les surfaces foliaires des laitues peuvent être comparées sans biais. En effet, une température de la solution nutritive de 20°C peut mener à la performance optimale des plants en termes de rendements, de taux de nitrates dans les

feuilles, de biomasse des racines et de surface foliaire (Costa et al. 2011). Le modèle statistique exprimant la différence de surface foliaire en fonction du type de fertilisant indique que c'est la tour contenant l'association du Biosevia et du thé de compost qui mène de manière significative à la plus grande surface foliaire : cette information combinée au modèle exponentiel confirmé amène donc à considérer l'association du Biosevia et du thé de compost comme la meilleure solution nutritive testée dans l'expérimentation. Ce résultat peut être mis en relation avec le troisième paramètre de croissance, la taille racinaire : c'est cette même association qui mène à la taille racinaire la plus élevée. Or, une forte valeur de ce paramètre de croissance est significative d'une bonne qualité de culture en aéroponie. Le dernier paramètre de croissance correspondant à la masse fraîche récoltée, il vérifie également la performance du Biosévia associé au thé de compost (masse récoltée 3,75 fois plus grande que pour la tour de fertilisant minéral). Cependant, il est intéressant de noter que les hautes valeurs de températures de la solution nutritive ont impliqué un retard de croissance non négligeable, même pour la meilleure fertilisation. En effet, la masse moyenne d'une Merveille des 4 saisons se situe entre 120 et 180g à la récolte (Pépinière des Carlines 2015), alors qu'elle est égale ici à 75g en moyenne (1500 g pour 20 plants). Malgré l'impact des conditions météorologiques, il est tout de même pertinent d'assimiler l'association du Biosevia avec le thé de compost à la meilleure fertilisation de l'expérimentation.

4.2. Performance de l'association Biosevia et thé de compost

Il s'agit à présent d'exposer les raisons pour lesquelles cette association semble être la meilleure fertilisation. Le thé de compost est considéré comme un excellent biostimulant par ses actions phytoprotectrices et phytostimulantes (Maud Tragin - Astrédhor, s. d.). En effet, ce sont ces deux actions exercées par la qualité des micro-organismes qui peuvent expliquer les résultats de taille racinaire et de surface foliaire significativement plus élevés que le traitement du Biosevia seul. De plus, les tests du thé de compost en tant que fertilisant unique n'ayant pas été concluants, il est donc fortement conseillé d'utiliser ce dernier en tant que biostimulant et de l'associer à un autre fertilisant efficace. Dans le cadre de la réutilisation des biodéchets en milieu urbain en tant que fertilisants organiques pour les cultures en aéroponie, il serait donc plus intéressant d'associer le thé de compost à un fertilisant issu de la réutilisation de biodéchets plutôt qu'à un fertilisant commercial, même s'il est organique.

Les résultats très concluants sur l'utilisation du thé de compost en aéroponie s'ancrent aussi parfaitement dans le cadre de l'économie circulaire : son approvisionnement est très facilité par sa production locale, mais aussi par son mode de fabrication. C'est une source inépuisable, et les déchets ménagers sont produits en si grande quantité en France que leur réutilisation semble pertinente. Selon l'ADEME, 296 kg/hab/an de déchets ménagers sont produits, dont 36% correspondent à de la matière organique ou à des biodéchets (ADEME 2019).

4.3. Résultats des salades cultivées à base d'urine

La tour n°6 ayant subi le traitement du fertilisant à base d'urine apparaît, selon l'analyse de tous les paramètres, de loin la moins performante. En effet, les paramètres de croissance comme la taille racinaire, la surface foliaire et la masse fraîche récoltée sont tous significativement plus bas pour les salades de la tour à base d'urine que pour les autres. De plus, les plants morts au cours de l'expérimentation ne se trouvent que dans cette tour. Les

Tableau 5 : Récapitulatif des prix et quantités de fertilisant utilisés / Summary of prices and used quantities for each fertilizer (Source : Auteur)

Tour	Tour 1	Tour 2	Tour 3	Tour 4		Tour 5	Tour 6
Fertilisant	Maxigro	Biosevia	Thé de compost	Biosevia	Thé de compost	Digestat de méthanisation	Urine
Quantité totale d'engrais utilisé	0.014 kg	0.155 L	4.05 L	0.07 L	1.75 L	1.5 L	4.5 L
Quantité totale d'eau utilisée	134.8 L	156.2 L	135.7 L	119.6 L		113.5 L	140.9 L
Prix des fertilisants	30€/kg	15.28€/L	8.5€/L	15.28€/L + 8.5€/L		0.005€/L	

Tableau 6 : Marge finale sur une tour de cinq étages en fonction des fertilisants / Production cost of a five-storey tower for each fertilizer (Source : Auteur)

Tour	Tour 1	Tour 2	Tour 3	Tour 4		Tour 5	Tour 6
Fertilisant	Maxigro	Biosevia	Thé de compost	Biosevia	Thé de compost	Digestat de méthanisation	Urine
Prix de la tour	508	508	508	508		508	508
Prix total du fertilisant	0.48	2.36	34.42	1.69	14.87	0.00575	
Prix de l'eau	0.46	0.53	0.46	0.40		0.38	0.48
Prix de l'électricité	4.77	4.77	4.77	4.77		4.77	4.77
Prix intermédiaire	513.7	515.7	547.6	529.1		513.2	
Prix d'achat des plants	10	10	10	10		10	10
Prix de vente des salades	22	22	22	22		22	22
Marge finale	501.7	503.7	535.6	517.1		501.2	

conditions climatiques extrêmes ayant touché de manière égale toutes les tours, elles ne peuvent donc pas être considérées comme la cause principale du retard de croissance pour les salades de la tour à base d'urine. Les explications pourraient être les suivantes :

- Le produit utilisé est déclaré par la start-up Toopi-organics comme un biostimulant. Son action seule n'est donc pas censée être optimale. En revanche, l'idée a été la même que pour le thé de compost : tester son action seule pour en évaluer l'efficacité. En effet, des entreprises contactées seule Toopi-organics a répondu présente pour fournir des échantillons gratuits : ce biostimulant était donc le seul produit qu'il était possible de tester, mais l'utilisation d'un véritable fertilisant à base d'urine aurait sans doute été plus prometteur. En effet, une bibliographie très importante développée plus haut concerne l'efficacité de l'urine dans le milieu agricole. Seulement, peu d'expériences ont été menées en aéroponie, et l'utilisation d'un fertilisant liquide à base d'urine en aéroponie demande certainement plus de contrôles des paramètres physiologiques.
- L'analyse du diagramme en boîte représentant les différences de surfaces foliaires en fonction des fertilisants permet d'affirmer que le problème a été général et a concerné la totalité des plants (Figure 11) : en effet, les quantiles sont très rapprochés et très peu de valeurs extrêmes apparaissent. Les plans ont donc tous subi le même stress. Ce dernier est probablement lié à la solution nutritive : l'EC a significativement chuté sous la barre de 0.8 mS/cm le 27 juillet, pour remonter progressivement par la suite. Cette chute d'EC s'explique par une pénurie de fertilisant, qui a été livré par la suite mais selon des délais importants dus à la situation actuelle sanitaire. Il serait en revanche très intéressant de retester un fertilisant à base d'urine, et non un biostimulant, et ce plus tôt dans l'année, en ayant un stock de fertilisant prévu de manière à ne pas créer de chute dans la valeur de l'EC.

4.4. Analyse économique de la rentabilité des fertilisants

Afin de répondre à la problématique principale, une analyse économique peut être intéressante pour évaluer la pertinence de l'utilisation de chaque fertilisant.

- Prix des fertilisants : le prix de chaque fertilisant a été relevé sur les sites de vente (Culture Indoor s. d.) pour le Maxigro et le Biosevia (celui-ci ayant été remplacé récemment par Pro-organics, une nouvelle gamme au même prix que le Biosevia). Des mails ont été envoyés à chacun des fournisseurs de fertilisants organiques enfin d'avoir une estimation de prix, même si ces derniers ne sont pas encore commercialisables. Le prix du fertilisant à base d'urine n'a pas pu être dévoilé par ses fabricants, mais sera bientôt disponible (autorisation de mise sur le marché en 2021) (Tableau 5).
- Les quantités totales de fertilisants et d'eau ont également été relevées pour chaque tour, et les prix d'eau et d'électricité à Paris sont les suivants : 3.42€/m³ et 14.72 €/h/kW. Les pompes utilisées consomment 45 W/h.

. Les plants de salades coûtent 0.50€ chez Pépin Production et les salades se revendent 1.10€ la pièce. Il y a vingt plants par tour, et idéalement vingt salades vendues par tour. Le bilan économique par tour est donc représenté dans le Tableau 6, pour une durée de quatre semaines : le prix intermédiaire représente donc le coût de chaque tour sans récolte, et la marge finale d'une tour de salade de cinq étages est calculée en admettant que les vingt salades peuvent être vendues.

La différence de marge est très importante entre la tour à base de thé de compost et les autres. En effet, le prix du thé de compost donné par Les Alchimistes a été estimé de la manière suivante : 5L de compost sont nécessaires pour fabriquer 1L de thé de compost. Le premier est vendu 0.75€/L : le thé de compost a donc été estimé entre 2€/L et 15€/L. 8.5€/L a donc été retenu comme moyenne du prix. L'hypothèse de départ était la suivante : les fertilisants organiques étant moins concentrés en éléments majeurs, ils seront utilisés en plus grande quantité que les fertilisants commerciaux (organiques ou minéraux), et le prix total des fertilisants pour un cycle de quatre semaines sera donc plus élevé. Cette hypothèse est donc à modérer puisque le thé de compost est plus performant en biostimulant qu'en fertilisant seul. Ainsi, en biostimulant, ce dernier sera utilisé en quantité moindre. En revanche, la quantité totale d'urine ou de digestat utilisée est clairement plus importante que pour le Biosevia, mais une fois mis sur le marché, ces fertilisants seront certainement accessibles à un prix moindre.

Le digestat de méthanisation a un prix plutôt intéressant mais ne ressort pas comme étant le fertilisant le plus performant. Il serait donc intéressant de tester son efficacité couplée à un biostimulant naturel, provenant lui aussi du recyclage des biodéchets.

On peut également remarquer que la différence de marge est très faible entre une tour cultivée à base de fertilisant organique et une tour cultivée à base de fertilisant minéral. La différence se ferait donc plus certainement sur une ferme productive comme le toit de Cuisine Mode d'emploi(s), où cinquante tours de production peuvent être installées. L'économie circulaire est un des principes de bases de l'agriculture urbaine : elle l'inscrit dans une politique tournée vers le développement durable et l'utilisation de fertilisants organiques provenant de source inépuisable. Malgré la différence de prix qui augmenterait à l'échelle d'une ferme productive, le principe de cultiver à l'aide de fertilisants organiques en aéroponie reste le plus optimal à long terme. De plus en plus de grandes villes se tournent vers un programme écologique intensif, comme Bordeaux, Lyon, Strasbourg ou encore Tours (Le Monde 2020) : ceci pourrait placer l'agriculture urbaine au centre des préoccupations. L'île de France, par exemple, et en particulier l'ARB (Agence Régionale de la Biodiversité) lance des appels à projets, ou encore des appels à manifestation d'intérêt concernant l'agriculture urbaine et péri-urbaine (ARB îdF s. d.). En effet, différents projets de l'année 2020 sont parmi les suivants, et fournissent des subventions :

- « Reconquérir les friches franciliennes », qui tente entre-autre de pérenniser ou recréer des espaces naturels et de remettre en culture des friches agricoles (ARB îdF s. d.).
- IdFood 2020 : le concours de l'innovation alimentaire de Paris et sa région. Les candidats peuvent être restaurateurs, artisans, ou agriculteurs : l'idée est de soutenir des acteurs locaux pour les accompagner dans leur innovation en faveur du secteur alimentaire, notamment en ce qui concerne l'éco-responsabilité (« Présentation | IdFood » s. d.).

Ces concours ou appels à projet se font de plus en plus nombreux, et peuvent représenter un réel soutien financier et ainsi encourager l'utilisation des fertilisants organiques, ainsi que le développement de l'agriculture urbaine dans l'économie circulaire.

4.5. Des normes obligatoires pour commercialiser les fertilisants organiques

L'enjeu de l'agriculture urbaine aujourd'hui est de s'ancrer dans un fonctionnement local de vente de produits agricoles et d'approvisionnement en fertilisants organiques. Seulement, pour commercialiser des produits alimentaires issus de l'agriculture urbaine, les fertilisants organiques doivent être commercialisables. Pour cela, plusieurs procédures sont possibles.

4.5.1. Explication des différentes procédures envisageables

La première possibilité est d'obtenir une Autorisation de Mise sur le Marché en suivant les trois points suivants (Direction Générale des Entreprises 2017) :

- Respecter les conditions de mise sur le marché et d'utilisation des matières fertilisantes stipulées dans le code rural et de la pêche maritime
- Respecter le décret du 16 juin 1980 qui prévoit entre autres les vérifications auxquelles doit procéder le responsable de mise sur le marché
- Remplir les critères de l'arrêté du 21 décembre 1998 relatifs à l'homologation des matières fertilisantes et des supports de culture (Mission d'Animation de la Filière Compostage en Région Provence-Alpes-Côtes-d'Azur, s. d.) : parmi ces critères se trouvent ceux d'innocuité. Ils concernent les seuils à ne pas dépasser en termes d'éléments traces métalliques, de présence de micro-organismes pathogènes pour l'homme ou encore les composés en traces organiques (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail 2019). Après dépôt du dossier, celui-ci est examiné par l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail). Elle aura la charge de relever l'absence d'effet nocif sur la santé humaine, animale et sur l'environnement.

Les deux autres possibilités relèvent d'une dispense d'AMM et sont stipulées par l'article L.255-5 du code rural (Chambre Syndicale des Améliorants Organiques et Supports de Culture 2016) :

- Une d'elle couvre la plus grande partie des tonnages de fertilisants organiques vendus en France : ils sont commercialisés sous couvert des normes rendues d'application obligatoires, dont la liste est tenue à jour par le Ministère de l'Agriculture (Direction Générale des Entreprises 2017). Ces lois ont l'intitulé de NFU et sont régies par l'AFNOR (Association Française de Normalisation).
- L'autre exemption correspond à la conformité du règlement CE (Comité Européen) du 13 octobre 2003.

Plusieurs autres exceptions peuvent être faites à l'AMM, dont la suivante qui est particulièrement intéressante pour les biostimulants tels que le thé de compost ou l'urine. En effet, il s'agit des « substances naturelles à usage biostimulant autorisées conformément à la procédure particulière prévue dans l'article L. 253-1 » (Direction Générale des Entreprises 2017). Ce dernier stipule que ces substances sont autorisées selon une procédure et une évaluation simplifiées fixées par voie réglementaire (*Code rural et de la pêche maritime - Article L253-1*, s. d.): elles se retrouvent dans le règlement 2019/1009 du parlement européen et s'inscrivent clairement dans la volonté d'inciter à l'économie circulaire en recyclant les biodéchets en fertilisants organiques (*Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) no 1069/2009 et (CE) no 1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) no 2003/2003 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) 2019*).

Une clé de détermination a été réalisée et est disponible en annexe (Annexe XII : Clef de détermination simplifiée pour l'obtention d'une AMM)

4.5.2. Normalisation des fertilisants utilisés

Les fertilisants organiques utilisés ici sont issus de biodéchets et ne sont pas tous commercialisables à l'heure actuelle. Les fertilisants Biosevia et Maxigro étant déjà commercialisables, ils ne seront pas évoqués.

Le digestat de méthanisation est un fertilisant organique qui peut être utilisé selon un plan d'épandage, décrit dans la Directive Nitrate (Lavayssière, s. d.). En revanche, il est classé comme un déchet dans la réglementation ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) et relève du code rural. Afin de le vendre en tant que fertilisant organique, les unités de méthanisation doivent respecter les procédures d'homologation et obtenir une AMM (A.I.L.E 2015). Peu d'unités ont encore réussi à les obtenir (digestat de méthanisation), ce qui est le cas pour l'unité du Zoo de Beauval. La plupart des unités de méthanisation fonctionnent déjà avec un plan d'épandage et les agriculteurs des alentours.

Bactipi (à base d'urine) est déjà conforme au règlement CE 2019/1009, qui met en valeur la réutilisation de biodéchets en tant que fertilisants organiques (Annexe XI : Fiche technique du produit Bactipi). Son autorisation de mise sur le marché est prévue pour 2021. Le thé de compost fourni par Les Alchimistes pouvant être considéré comme un biostimulant au même titre que Bactipi, sa commercialisation serait rendue possible par sa conformité au règlement 2019/1009. Ce dernier règlement étant très propice au développement de l'économie circulaire et à la réutilisation des biodéchets en tant que fertilisants, les résultats présentés concernant le jus de compost sont d'autant plus intéressants : il n'est pas inespéré de voir arriver un jour ce biostimulant sur le marché et de pouvoir l'utiliser afin d'améliorer les cultures de fruits et légumes en culture hors sol, en milieu urbain ou péri-urbain.

5. Conclusion et perspectives

5.1. Réponse à la problématique principale et aux hypothèses soulevées

L'expérience a donc été réalisée dans le cadre d'une démarche agroécologique de Cueillette Urbaine, et avait comme objectif de déterminer dans quelles mesures une fertilisation à base de produits organiques issus de la réutilisation de biodéchets peut être aussi performante qu'une fertilisation à base de produits minéraux commerciaux. Plusieurs hypothèses avaient été soulevées, et la comparaison expérimentale de six fertilisations différentes sur une culture de salades en aéroponie a permis d'y répondre. La comparaison s'est donc faite sur plusieurs aspects : agronomique (résultat de la meilleure culture, qualitativement et quantitativement parlant), économique (analyse des coûts de production), écologique (impact environnemental du fertilisant) ou encore réglementaire (respect des normes pour obtenir la commercialisation). Il est important de préciser que les conditions climatiques ont été exceptionnelles, mais qu'elles ont touché de manière égale toutes les tours et ont été évincées des principaux biais qui auraient pu intervenir. Il serait pertinent, en revanche, de retester ces mêmes fertilisants plus tôt dans l'année afin de ne pas devoir prendre en compte la montaison.

Ainsi, les fertilisants minéraux commerciaux sont certes plus concentrés, mais le Maxigro n'a pas paru le plus efficace dans cette expérimentation. En effet, c'est plutôt l'association entre le Biosevia et le thé de compost qui a donné la meilleure fertilisation d'un point de vue

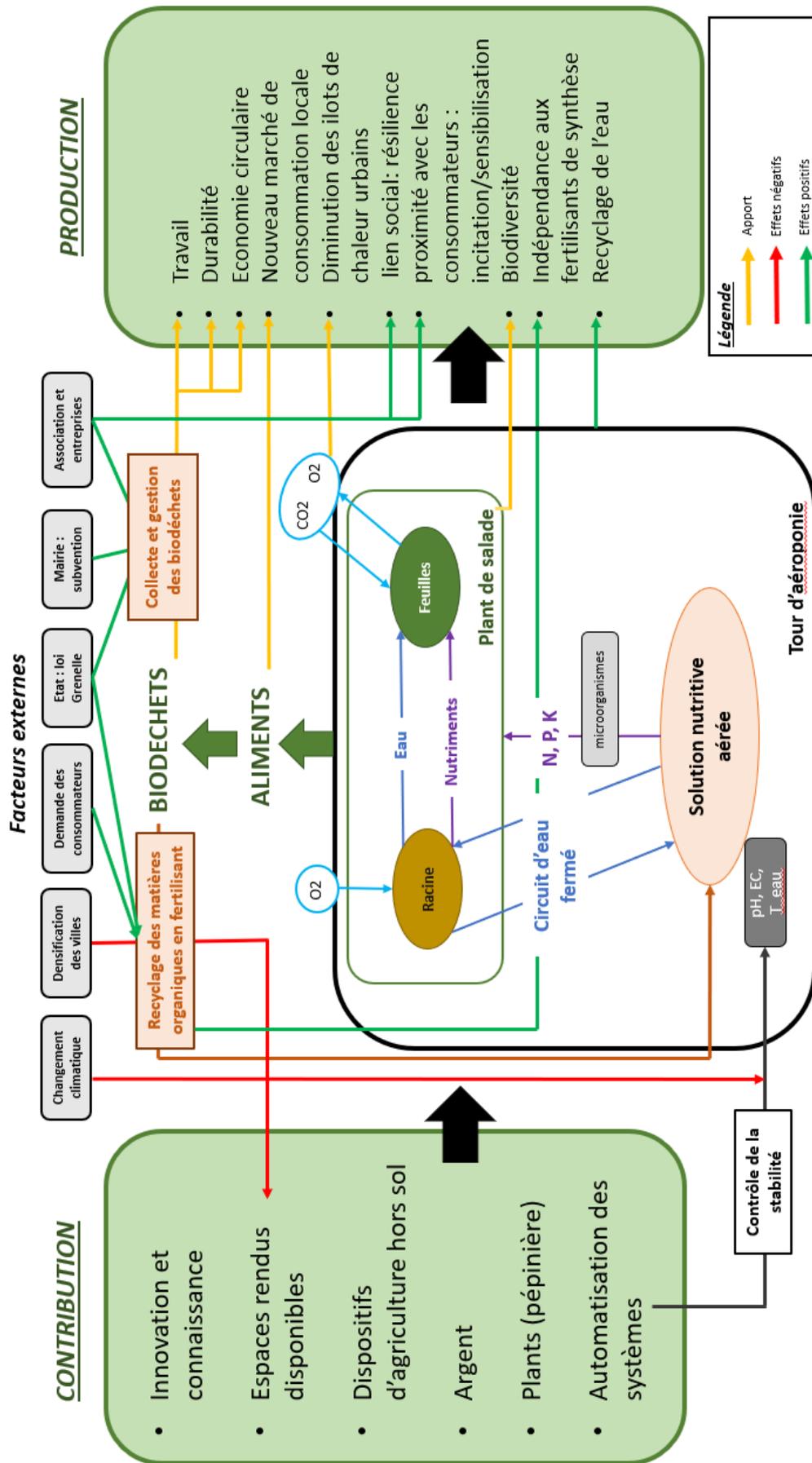


Figure 14 : Schéma conceptuel / Conceptual scheme

agronomique : les taille racinaire et surface foliaire étaient significativement les plus importantes, signifiant que le thé de compost a certainement joué son rôle de biostimulant. Cette association peut néanmoins être discutée, car le Biosevia est un fertilisant commercial organique ayant également été fabriqué à base de co-produits comme la vinasse, mais ne rentrant pas dans la réutilisation des biodéchets locaux comme le compost ou le digestat de méthanisation. Il serait donc intéressant de tester l'effet biostimulant du thé de compost sur des fertilisants organiques issus de recyclage des biodéchets, de manière à ancrer la ferme urbaine de Cueillette Urbaine dans une économie circulaire parfaite et se détacher de sa dépendance aux fertilisants organiques de synthèse. Pour terminer la comparaison des fertilisants d'un point de vue agronomique, le digestat de méthanisation ne semble pas se démarquer des autres fertilisants, mais une deuxième série de test plus tôt dans l'année serait recommandée pour vérifier cette conclusion. La pénurie de fertilisant à base d'urine a clairement impacté la performance agronomique de ce dernier : il serait donc extrêmement intéressant de le retester aussi. Enfin, certains paramètres auraient été intéressants à analyser, comme le taux d'accumulation, et la masse sèche à la récolte. Seulement le matériel à disposition n'étant pas suffisant, il n'a pas été possible de procéder à ces expérimentations complémentaires. La culture hors-sol se développe de plus en plus actuellement, et les technologies et les connaissances en bioponie ne font que s'améliorer : beaucoup de paramètres sont encore à étayer pour rendre cette technique de culture optimale.

Ensuite, les fertilisants organiques liquides issus de biodéchets sont moins concentrés, et doivent être utilisés en plus grande quantité pour répondre aux besoins physiologiques de la salade. En effet, on peut remarquer que l'urine, le digestat et le thé de compost ont été utilisés en quantités plus importantes que les fertilisants commerciaux, et leur prix n'a pu être qu'estimé puisqu'ils ne sont pas encore mis sur le marché. C'est donc ici que les trois dernières hypothèses sont discutées : les fertilisants organiques liquides testés ici ne sont pas encore commercialisables, car la mise sur le marché est un processus très complexe et fastidieux, mais accessible. Ainsi, les prix estimés changeront certainement, car les fertilisants à base de biodéchets seront produits en plus grandes quantités et donc plus accessibles aux fermes urbaines souhaitant s'inscrire dans une économie circulaire poussée. Il est par ailleurs nécessaire de continuer à penser l'approvisionnement des fertilisants organiques de manière locale, et ce même après leur mise sur le marché : la démarche agroécologique de l'agriculture urbaine reste pertinente lorsqu'elle est ancrée dans son territoire, et ne demande donc qu'à se développer pour faciliter l'accès des citoyens aux produits locaux. Un schéma conceptuel en annexe (Figure 14) représente un agrosystème en bioponie, avec les contributions, productions et facteurs externes.

5.2. Perspectives d'avenir

Actuellement, les projets d'agriculture urbaine en France, et plus particulièrement à Paris, fonctionnent de manière assez individuelle (Morel-Chevillet 2016). Mais ces derniers ne demandent qu'à être liés au métabolisme des villes : à la participation de la gestion des déchets urbains, à l'innovation des systèmes de culture et de commercialisation, ou encore à l'optimisation de l'espace. En effet, c'est en laissant s'exprimer les différentes formes de production et le croisement des approches que l'innovation se développera, et de manière optimale pour proposer des solutions adaptées aux enjeux de la ville (Haddad 2018).

L'innovation agroécologique de l'agriculture urbaine est attendue néanmoins sur plusieurs aspects : l'aspect agronomique est prépondérant, en ce qu'il reste très prometteur en termes de nouveaux fertilisants organiques issus de biodéchets ou encore de dispositifs automatisés à mettre en place pour optimiser la stabilité des solutions nutritives (Domingues et al. 2012). Mais le lien social est aussi extrêmement important et peut participer à la création d'une société humaine résiliente (Mayol et Gangneron 2019). La dimension éco-responsable des fermes urbaines pourrait également se développer (Morel-Chevillet 2016) : la gestion des déchets en ville pourrait être prise en charge dans son intégralité. En effet, les fermes intra-urbaines seraient chargées de la collecte des déchets, et les périphériques pourraient les transformer en fertilisants organiques pour la production agricole urbaine. La ferme urbaine V'île fertile, micro-ferme associative à Vincennes, produit déjà en pleine terre en tirant partie des ressources organiques de la ville (« V'île Fertile - La ferme urbaine participative » s. d.). Cet exemple ne peut laisser qu'espérer des futures collaborations avec des fermes intra-urbaines en culture hors-sol, qui rapprocheraient les acteurs au cœur d'une économie circulaire locale et où les intermédiaires et leur impact environnemental seraient limités.

Bibliographie

- AC-orléans-tours. s. d. « Estimer une incertitude ». https://www.ac-orleans-tours.fr/fileadmin/user_upload/physique/accompagnement_personnalise/premiere/AP_1S_mesures_incertaines_prof_DILUTION.pdf.
- ADEME. 2017. « Unité de méthanisation au zooparc de Beauval ».
- . 2018. « Expertises, Économie circulaire ». ADEME. 2018. <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>.
- . 2019. « Déchets chiffres-clés, l'essentiel 2019 ». https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets_chiffrescles_essentiel_2019_010695.pdf.
- Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail. 2019. « Avis de l'ANSES relatif au projet d'arrêté fixant la composition des dossiers de demandes relatives à des autorisations de mise sur le marché et permis de matières fertilisantes, d'adjuvants pour matières fertilisantes et de supports de culture ».
- « Agriculture biologique : quelle réglementation ? » 2017. 2017. <https://agriculture.gouv.fr/lagriculture-biologique-1>.
- Agriculture.gouv. 2013. « Qu'est-ce que l'agroécologie ? » 2013. <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-lagroecologie>.
- Agricultures & Territoires - Chambres d'agriculture Aube Marne Haute-Marne. 2018. « Techniques AGRO - L'agronomie au coeur des cultures ».
- A.I.L.E. 2015. « Fraction liquide de digestat issue de séparation de phases ».
- « ALMA Grown in town - Jardinerie parisienne ». s. d. Consulté le 28 juillet 2020. <https://almagrownintown.fr/>.
- ANPEA-Filière Fertilisation. 2013. « Observatoire national de la fertilisation minérale et organique - Synthèse des données existantes sur la vente et l'utilisation de produits fertilisants en France ».
- ARB îdF. s. d. « Appel à manifestation d'intérêt «Reconquérir les friches franciliennes» ». Consulté le 28 juillet 2020a. https://www.arb-idf.fr/article/appel-manifestation-dinteret-reconquerir-les-friches-franciliennes?utm_source=email&utm_campaign=IN_198&utm_medium=email.
- . s. d. « La Région Île-de-France lance un appel à projets d'agriculture urbaine ». Consulté le 28 juillet 2020b. <https://www.arb-idf.fr/article/la-region-ile-de-france-lance-un-appel-projets-dagriculture-urbaine>.
- Argo, Bill. 2003. « Understanding pH management and plant nutrition ». *Journal of the International Phalaenopsis Alliance* 12 (4).

- Astrédhor-Institut technique de l'horticulture. s. d. « Le thé de compost-Bilan des essais 2014-2016 ». <http://itab.asso.fr>.
- Benton Jones, J.Jr. 2014. *Complete guide for growing plants hydroponically*. CRC Press.
- « Bioponie – Culture hydroponie organique ». s. d. Consulté le 28 août 2020. <http://bioponie.fr/>.
- Biostimulant agriculture. 2019. « Quel est le rôle des biostimulants en agriculture ? » *Biostimulant agriculture* (blog). 2019. <https://biostimulants-agriculture.com/2019/10/24/quel-est-le-role-des-biostimulants-en-agriculture/>.
- Chambre Syndicale des Améliorants Organiques et Supports de Culture. 2016. « Les Fertilisants : les clés pour la réglementation de mise en marché ».
- « Champignons et bactéries bénéfiques ». 2014. *Hydroponie.fr* (blog). 2014. <http://hydroponie.fr/champignons-bacteries-benefiques/>.
- Code rural et de la pêche maritime - Article L253-1*. s. d. *Code rural et de la pêche maritime*. Vol. L253-1.
- Cometti, Nilton N., Diene M. Bremenkamp, Karla Galon, Leonardo R. Hell, et Marinaldo F. Zanotelli. 2013. « Cooling and concentration of nutrient solution in hydroponic lettuce crop ». *Horticultura Brasileira* 2 (31): 287-92. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000200018>.
- Costa, Luisa Dalla, Nicola Tomasi, Stefano Gottardi, Francesco Iacuzzo, Giovanni Cortella, Lara Manzocco, Roberto Pinton, Tanja Mimmo, et Stefano Cesco. 2011. « The Effect of Growth Medium Temperature on Corn Salad [*Valerianella locusta* (L.) Laterr] Baby Leaf Yield and Quality ». *HortScience* 46 (12): 1619-25. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.12.1619>.
- « Cueillette Urbaine ». 2020. 2020. <https://www.cueilletteurbaine.com/>.
- Culture Indoor. s. d. « Hydroponie, matériel de jardinage et materiel hydroponique | Culture Indoor : Sachez planter sans vous planter ! » Consulté le 28 juillet 2020. <https://www.cultureindoor.com/>.
- Direction Générale des Entreprises. 2017. « Réglementation non harmonisée au niveau européen - Matières fertilisantes et supports de culture ».
- Domingues, Diego S., Hideaki W. Takahashi, Carlos A.P. Camara, et Suzana L. Nixdorf. 2012. « Automated System Developed to Control PH and Concentration of Nutrient Solution Evaluated in Hydroponic Lettuce Production ». *Computers and Electronics in Agriculture* 84: 53-61. <https://doi.org/10.1016/2012/006>.
- FAO. 1999a. « Comité de l'Agriculture - Quinzisième session ». http://www.fao.org/unfao/bodies/coag/cOAG15/X0075f.htm#P88_4719.
- . 1999b. « Question relatives à l'agriculture urbaine ». <http://www.fao.org/Ag/fr/magazine/9901sp2.htm#:~:text=L'agriculture%20urbaine%20>

et%20p%C3%A9riurbaine%20(AUP)%20se%20r%C3%A9f%C3%A8re%20aux,besoins%20de%20la%20population%20urbaine.

Foucard, Pierre, et Aurélien Toqueville. 2019. *Aquaponie - Associer aquaculture et production végétale*. 1ère Edition. Editions Quae.

General Hydroponics Europe. s. d. « La bioponie une hydroponie « bio » ? » Consulté le 24 juillet 2020. <https://www.eurohydro.com/fr/la-bioponie-une-hydroponie-bio>.

Gopinath, P., P. Irene Vethamoni, et M. Gomathi. 2017. « Aeroponics Soilless Cultivation System for Vegetable Crops ». *Chemical Science Review and Letters* 6 (22): 838_849.

Haddad, Yaël. 2018. « Agriculture urbaine : quelles opportunités pour les producteurs? » *Le Lien Horticole*, n° 1051: 16-17.

Hoffmann, William A., et Hendrik Poorter. 2002. « Avoiding Bias in Calculations of Relative Growth Rate ». *Annals of Botany* 90 (1): 37-42. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf140>.

« Infoclimat - la météo en temps réel : observations météo en direct, prévisions, archives climatologiques, photos et vidéos... » s. d. Consulté le 14 août 2020. <https://www.infoclimat.fr/>.

Institut d'Aménagement et d'Urbanisme. 2010. « Les îlots de chaleur urbains - L'adaptation de la ville aux chaleurs urbaines ».

Jönsson, H., A.R. Stintzing, B. Vinneras, et E. Salomon. 2004. *Guidelines on the use of urine and faeces in crop production*. EcoSanRes Programme.

Jung, Dae Ho, Damin Kim, Hyo In Yoon, Tae Won Moon, Kyoung Sub Park, et Jung Eek Son. 2016. « Modeling the canopy photosynthetic rate of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in a plant factory at varying CO₂ concentrations and growth stages ». *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 57 (5): 487-92. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-0103-z>.

Karak, Tanmoy, et Pradip Bhattacharyya. 2011. « Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (4): 400-408. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.12.008>.

Katsuwon, J., et A. J. Anderson. 1992. « Characterization of catalase activities in a root-colonizing isolate of *Pseudomonas putida* ». *Canadian Journal of Microbiology* 38 (10): 1026-32. <https://doi.org/10.1139/m92-169>.

Lakhiar, Imran Ali, Jianmin Gao, Tabinda Naz Syed, Farman Ali Chandio, et Noman Ali Buttar. 2018. « Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics ». *Journal of Plant Interactions* 13 (1): 338-52. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308>.

Lavayssière, Maxime. s. d. « Expertise Juridique - Méthanisation, faire évoluer la statut juridique des digestats ».

- Le Monde. 2020. « Municipales 2020 : avec EELV, une vague verte historique déferle sur les grandes villes françaises ». *Le Monde.fr*, 29 juin 2020. https://www.lemonde.fr/politique/article/2020/06/29/municipales-2020-une-vague-verte-historique-deferle-sur-les-grandes-villes-francaises_6044496_823448.html.
- Lee, Seungjun, et Jiyoung Lee. 2015. « Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of hydroponic food production methods ». *Scientia Horticulturae* 195: 206-15. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015/09/011>.
- Les Alchimistes. s. d. « Collecte et compostage de biodéchets en Ile-de-France ». *Les Alchimistes* (blog). Consulté le 28 août 2020. <https://alchimistes.co/compost-paris/>.
- Les services de l'État en Loire-Atlantique. s. d. « Le plan nature en ville / Le plan nature en ville / Ville durable / Aménagement du territoire, urbanisme, habitat, construction / Politiques publiques / Accueil ». Consulté le 27 juillet 2020. <https://www.loire-atlantique.gouv.fr/Politiques-publiques/Amenagement-du-territoire-urbanisme-habitat-construction/Ville-durable/Le-plan-nature-en-ville/Le-plan-nature-en-ville>.
- Mason, John. 1996. *Commercial Hydroponics 3rd Edition*.
- Maud Tragin - Astrédhor. s. d. « Thé de compost: description, mode d'application et résultats ». http://itab.asso.fr/downloads/jt-intrants-2016/12_tragin-the-de-compost.pdf.
- Mayol, Pascal, et Etienne Gangneron. 2019. « L'agriculture urbaine: un outil déterminant pour des villes durables ». Journal officiel de la République Française - Avis du Conseil Economique, Social et Environnemental. https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2019/2019_15_agriculture_urbaine.pdf.
- Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 2016. « Vers une gestion durable du phosphore, ressource critique pour l'agriculture ». *Analyse - Centre d'études et de prospective* 93.
- Mission d'Animation de la Filière Compostage en Région Provence-Alpes-Côtes-d'Azur. s. d. « Le compostage en Provence-Alpes-Côte d'Azur : les seuils concernant les critères d'innocuité ». www.compostage-paca.fr.
- Morel-Chevillet, Guillaume. 2016. « Agriculture urbaine et économie circulaire ». Astrédhor. <https://www.astredhor.fr/data/info/172076-CR432.pdf>.
- Pandey, S.K., et Hema Singh. 2011. « A simple, cost-effective method for leaf area estimation ». *Journal of Botany* 2011 (3): 1-6. <https://doi.org/10.1155/2011/658240>.
- Pépin Production. s. d. « Qui sommes-nous ? » *Pépins production* (blog). Consulté le 28 août 2020. <https://www.pepinsproduction.fr/>.
- Pépinrière des Carlines. 2015. « Catalogue illustré - Laitues - Printemps 2015 ».

- Pradhan, Surendra K., Jarmo K. Holopainen, et Helvi Heinonen-Tanski. 2009. « Stored Human Urine Supplemented with Wood Ash as Fertilizer in Tomato (*Solanum lycopersicum*) Cultivation and Its Impacts on Fruit Yield and Quality ». *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57 (16): 7612-17. <https://doi.org/10.1021/jf9018917>.
- Pradhan, Surendra K., Anne-Marja Nerg, Annalena Sjöblom, Jarmo K. Holopainen, et Helvi Heinonen-Tanski. 2007. « Use of Human Urine Fertilizer in Cultivation of Cabbage (*Brassica oleracea*)-- Impacts on Chemical, Microbial, and Flavor Quality ». *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55 (21): 8657-63. <https://doi.org/10.1021/jf0717891>.
- « Présentation | IdFood ». s. d. Consulté le 28 juillet 2020. <https://concours-idfood.fr/presentation>.
- Prevot, Laurent, Franck Aries, et Pascal Monestiez. 1991. « Modelisation de la structure geometrique du maïs ». *Agronomie* 11 (6): 491-503.
- Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) no 1069/2009 et (CE) no 1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) no 2003/2003 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). 2019. OJ L. Vol. 170. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/fra>.
- Repetto, A., M. Cadinu, et S. Leoni. 1994. « The effect of plant position on root development and vegetative growth in aeroponic lettuce ». *Acta Horticulturae*, n° 361: 603-11. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.361.67>.
- Ruget, Françoise, R Bonhomme, et M Chartier. 1996. « Estimation simple de la surface foliaire de plantes de maïs en croissance ». *Agronomie* 16 (9): 553-62.
- Scaife, M. A. 1973. « The early relative growth rates of six lettuce cultivars as affected by temperature ». *Annals of Applied Biology* 74 (1): 119-28. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1973.tb07730.x>.
- Service méthanisation-machinisme. Chambre d'Agriculture région Nord-Pas de Calais. 2018. « Etude préalable à la valorisation des digestats en agriculture - SARL Energie Verte du Bayard ».
- Sublett, William, T. Barickman, et Carl Sams. 2018. « The Effect of Environment and Nutrients on Hydroponic Lettuce Yield, Quality, and Phytonutrients ». *Horticulturae* 4 (4): 48. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4040048>.
- Sylvia, David M., et David H. Hubbell. 1986. « Growth and Sporulation of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Aeroponic and Membrane Systems ». *Symbiosis* 1 (3).
- Toopi Organics. s. d. « Toopi Organics | Recycler l'Urine Humaine pour l'Agriculture et l'industrie. » Toopi Organics. Consulté le 20 avril 2020. <https://toopi-organics.com/>.

- Udert, Kai M., Tove A. Larsen, Martin Biebow, et Willi Gujer. 2003. « Urea Hydrolysis and Precipitation Dynamics in a Urine-Collecting System ». *Water Research* 37 (11): 2571-82. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00065-4).
- Universalis, Encyclopædia. s. d. « MILIEU, écologie ». Encyclopædia Universalis. Consulté le 24 juillet 2020. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/milieu-ecologie/>.
- Vear, Felicity, Anne-Marie Tribou, Lecoœur, Patrick Vinourt, et Philippe Debaeke. 2010. « Les possibilités de sélection pour le rendement en grains du tournesol par l'étude de caractères morphologiques et architecturaux ». *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 17 (3): 139-42. <https://doi.org/10.1051/ocl/2010/0305>.
- « V'île Fertile - La ferme urbaine participative ». s. d. V île Fertile - Site web. Consulté le 29 août 2020. /.
- Ville de Paris. 2016. « Les Parisculteurs / Site Officiel ». 2016. <http://www.parisculteurs.paris/fr/home/>.

Annexes

Annexe I : Composition du Maxigro

10 - 5 - 14	
GUARANTEED ANALYSIS	
Total Nitrogen (N).....	10.0%
1.5% Ammoniacal Nitrogen (N)	
8.5% Nitrate Nitrogen (N)	
Available Phosphate (P ₂ O ₅).....	5.0%
Soluble Potash (K ₂ O).....	14.0%
Calcium (Ca).....	6.0%
Magnesium (Mg).....	2.0%
2.0% Water Soluble Magnesium (Mg)	
Sulfur (S).....	3.0%
3.0% Combined Sulfur (S)	
Iron (Fe).....	0.12%
0.12% Chelated Iron (Fe)	
Manganese (Mn).....	0.05%
0.05% Chelated Manganese (Mn)	
Derived from: Ammonium Molybdate, Ammonium Nitrate, Calcium Nitrate, Calcium Sulfate, Copper Sulfate, Iron DTPA, Magnesium Sulfate, Manganese EDTA, Potassium Borate, Potassium Nitrate, Potassium Phosphate and Zinc Sulfate.	

Source : (« General Hydroponics Europe : engrais minéraux et organiques, systèmes hydroponiques » s. d.)



Fiche Technique BioSevia

DESCRIPTION

BioSevia est un engrais qui répond aussi au règlement CEE N° 834/2007 concernant le mode de production biologique.

BioSevia se présente en deux parties: l'une pour la croissance «BioSevia Grow» et l'autre pour la floraison et la fructification «BioSevia Bloom», que l'on utilise ensemble ou séparément, en fonction du cycle de développement de la plante.

MODE D'ACTION :

Une partie des éléments est disponible et rapidement absorbée par la plante donnant des résultats visibles dès les premières applications. Les éléments complexés sont dégradés rapidement par les micro-organismes du sol, selon le processus naturel. L'utilisation de BM (trichoderma harzianum, un champignon bénéfique) en conjonction avec EcoFlor accélère son action.

MODE D'EMPLOI :

Diluer dans l'eau d'arrosage à la dose de 2 ml/L ou 200 ml pour 100 L.

Utilisez en cas de besoin reconnu.

CONDITIONNEMENT :

Bouteilles de 1L - Jerricans de 5 L - 10 L - 60 L

BioSevia Grow - CROISSANCE

NPK 3 - 1 - 6

COMPOSITION – ANALYSE TYPE

BioSevia Grow est un engrais complet qui apporte tous les éléments nécessaires pendant la période de croissance de la plante.

Garanti à l'analyse :

Azote nitrique	0,03%
Azote ammoniacal	0,9%
Azote organique	3%
Azote total	3,93%
Phosphore P ₂ O ₅	1,95%
Sulfates SO ₄	5%
Potassium K ₂ O	6%
Magnesium MgO	1,5%
Fer (Fe)	1100 ppm
Cuivre (Cu)	150 ppm
Zinc (Zn)	130 ppm
Bore (Bo)	150 ppm
Manganèse (Mn)	450 ppm

BioSevia Bloom - «FLEURS & FRUITS»

NPK 2 - 3 - 4

COMPOSITION

BioSevia « F & F » est un engrais complet qui apporte tous les éléments nécessaires pendant les périodes de floraison et de fructification de la plante.

Garantie à l'analyse :

Azote nitrique	0,02%
Azote ammoniacal	0,65%
Azote organique	1,53%
Azote total	2,20%
Phosphore (P ₂ O ₅)	3%
Sulfates (SO ₄)	6%
Potassium (K ₂ O)	4%
Magnesium (MgO)	1,8%
Fer (Fe)	320 ppm
Cuivre (Cu)	60 ppm
Zinc (Zn)	110 ppm
Bore (Bo)	36 ppm
Manganèse (Mn)	100 ppm

Source : (« General Hydroponics Europe : engrais minéraux et organiques, systèmes hydroponiques » s. d.)

Annexe III : Composition du thé de compost



ANALYSE D'EAU RESIDUAIRE



DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

LES ALCHEMISTES
LE PHARES , 6 RUE ARNOLD GERAUX
93450 ILE-SAINT-DENIS

DESTINATAIRE

Code organisme : 3022840

VEGETAL SOCIAL
268 RUE DU FAUBOURG SAINT ANTOINE
75012 PARIS

Technicien : Paul ROUSSELIN

Station			
Commune (Dpt)			
Affaire	N° de commande		
Date début pré	20/07/2020 00:00	Date d'arrivée	24/07/2020 7:45:00
Date fin pré		Début d'analyse	24/07/2020 9:30:00
Date et heure collecte		Date d'édition	04/08/2020 (v.1)
Température collecte		Type de prélèvement	

Température de réception (°C) : 12

N° LIMS	EREL20046249	RÉFÉRENCE CLIENT	THE DE COMPOST - DECHETS URBAIN	
N° ECHANTILLON	97079810	NATURE	Eau résiduaire	TYPE D'EAU
				Effluent divers pour épandage

Échantillon prélevé par le client
Les incertitudes de mesures sont disponibles sur le site internet du laboratoire (www.aurea.eu), rubrique 'qualité'. Les commentaires contenus dans ce rapport ne sont pas couverts par l'accréditation Cofrac ; ils ne tiennent pas compte du calcul des incertitudes. L'accréditation COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation. Les déterminations accréditées réalisées en interne sont précédées du symbole Φ. Les déterminations précédées du signe 'pea' ont été confiées à un prestataire externe accrédité et sont couvertes par l'accréditation et celles précédées du signe 'pe' ont été confiées à un prestataire externe non accrédité. Ce rapport d'analyse ne concerne que l'échantillon soumis à l'analyse. Sa reproduction n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il ne doit pas être reproduit partiellement sans l'approbation du laboratoire. Échantillon conservé au laboratoire entre 2 et 5°C.

COFRAC	DÉTERMINATIONS	NORMES	SYMBOLES & UNITÉS	RÉSULTATS
PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES				
Physico-chimie de base				
Φ	Potentiel hydrogène	NF EN ISO 10523	pH	unité pH 7,3
	Température de mesure du pH	NF EN ISO 10523		°C 17,9
	Extrait sec (à 105 °C)	Méthode interne		mg/L 17020,1
Φ	Carbone organique total	NF EN 1484	COT	mg/L 4850
Φ	Azote total Kjeldahl	NF EN 25663	NTK	mg/L 1060
	Rapport C/N	Calcul		4,6
Φ	Azote ammoniacal	NF ISO 15923-1	NH4+	mg N/L 210
Φ	Phosphore total	(v) NF EN ISO 11885	P	mg/L 54
Φ	Calcium	(v) NF EN ISO 11885	Ca	mg/L 480
Φ	Magnésium	(v) NF EN ISO 11885	Mg	mg/L 44
Φ	Potassium	(v) NF EN ISO 11885	K	mg/L 1730
Φ	Sodium	(v) NF EN ISO 11885	Na	mg/L 980
Métaux et assimilés métaux				
	Bore	(v) NF EN ISO 11885	B	µg/L 850
	Fer	(v) NF EN ISO 11885	Fe	mg/L 19
Φ	Manganèse	(v) NF EN ISO 11885	Mn	µg/L 1780

Ce rapport est la version originale.
Les déterminations suivies de (v) ont fait l'objet d'une vérification interne.



Annexe IV : Composition du digestat de méthanisation



Rapport analyse d'effluents d'élevage

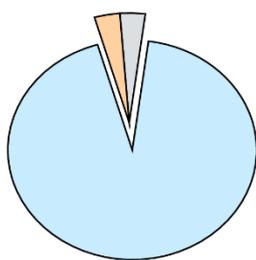
EXPLOITATION : ZOOPARC DE BEAUVAL - JOIE C. 41110 ST AIGNAN	ORGANISME : ZOOPARC DE BEAUVAL 41110 SAINT AIGNAN SUR CHER Technicien : Cédric JOIE
---	--

N° de laboratoire 12665448	Référence échantillon Référence : DIGESTAT LIQUIDE N° de commande :	Dates repères Date de prélèvement : 10/02/2020 Date de réception : 13/02/2020 Date de sortie : 27/02/2020
---	--	---

Effluent analysé : Digestat -

CARACTÉRISTIQUES DE L'EFFLUENT

Caractéristiques physiques :

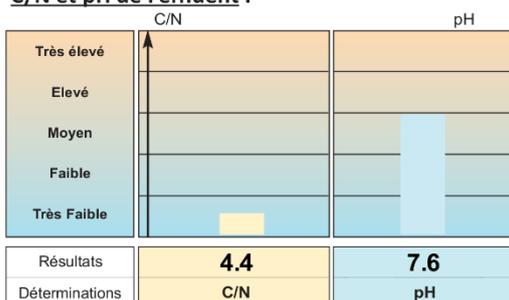


Déterminations	Résultats
Humidité %	94.3
Matières minérales % de produit brut	2.59
Matières organiques % de produit brut	3.14

Matières Sèches % : 5.7

■ Humidité ■ Matières minérales ■ Matières Organiques

C/N et pH de l'effluent :

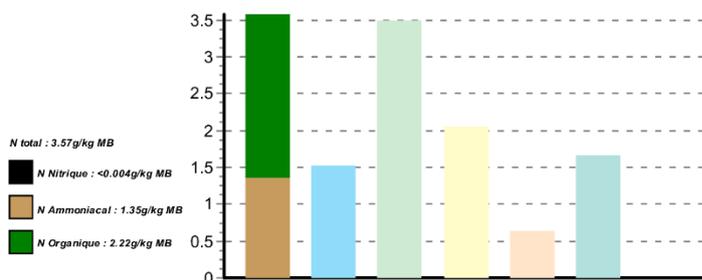


Le rapport C / N (Carbone / Azote total) est de 4.4, niveau très faible correspondant à une matière organique très "évoluée" qui libérera rapidement ses éléments nutritifs, mais qui aura un rendement en humus très faible.

Méthodes d'Analyses : Matière sèche et humidité (Méth. Interne selon NF EN 13040), Matière organique (Méth. Interne selon NF EN 13039), Azote Kjeldahl (NF EN 13854-1), Rapport C/N (Calcul : carbone organique = MO / 2), pH (Méthode interne selon NF EN 12176), N-NO3 et N-NH4 (Méthode interne extraction KCl), P2O5 total, K2O total, CaO total, MgO total, Na2O total, oligo-éléments totaux : Cu, Zn, Mn, Fe, B (extraction eau régale NF EN 13346, dosage NF EN ISO 11885)

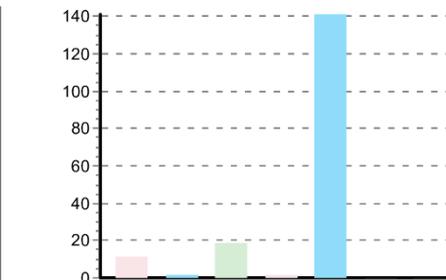
Éléments nutritifs

Éléments majeurs :



Déterminations	N TOTAL	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃
Résultats en g / kg de produit brut	3.6	1.5	3.5	2.0	0.6	1.7	

Oligo-éléments :



Déterminations	Zn	Cu	Mn	B	Fe	Mo	Co
Résultats en mg / kg de produit brut	11.3	1.9	18.4	2.0	141.0		
Résultats en mg / kg de produit sec	196.4	33.7	321.7	34.3	2460.1		

Valeur fertilisante

	N TOTAL	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃
Composition en kg / tonne de produit brut	3.6	1.5	3.5	2.0	0.6	1.7	
Coefficient d'effet direct en % (*)							
Valeur fertilisante année 1 en kg / tonne de produit brut							

(*) Coefficient d'effet direct : ce coefficient dépend de la nature du produit, de son mode d'épandage (enfouir ou non) ainsi que de la culture prévue. Pour l'azote, le bas de la fourchette correspond à des cultures récoltées en été (céréales, colza); le haut de la fourchette correspond à des cultures récoltées en automne (maïs, ...).

Résultats sur le sec à 105°C

Matière organique	% MS	54.85
P ₂ O ₅ total	g/kg MS	26.4
K ₂ O total	g/kg MS	60.8
MgO total	g/kg MS	10.99
CaO total	g/kg MS	35.8
Na ₂ O total	g/kg MS	29.030
SO ₃ total	g/kg MS	
Azote total	g/kg MS	62.27
Azote ammoniacal	g/kg MS	23.56
Azote nitrique	g/kg MS	<0.070
Azote organique	g/kg MS	38.64

Annexe V : Composition de Bactipi



DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

TOOPI-ORGANICS
RUE ZAE ECOPOLE
33190 LOUPIAC-DE-LA-REOLE

DESTINATAIRE

Code organisme : 3022840

VEGETAL SOCIAL
268 RUE DU FAUBOURG SAINT ANTOINE
75012 PARIS

Technicien : Paul ROUSSELIN

Station		N° de commande	
Commune (Dpt)		Date d'arrivée	24/07/2020 7:45:00
Affaire		Début d'analyse	24/07/2020 9:30:00
Date début préel	20/07/2020 00:00	Date d'édition	04/08/2020 (v.1)
Date fin préel		Type de prélèvement	
Date et heure collecte			
Température collecte			

Température de réception (°C) : 12

N° LIMIS	EREL20046250	RÉFÉRENCE CLIENT	TOOPI ORGANICS-BACTIPI
N° ECHANTILLON	97079811	NATURE	Eau résiduaire
		TYPE D'EAU	Effluent divers pour épandage

Échantillon prélevé par le client
Les incertitudes de mesures sont disponibles sur le site internet du laboratoire (www.aurea.eu), rubrique 'qualité'. Les commentaires contenus dans ce rapport ne sont pas couverts par l'accréditation Cofrac ; ils ne tiennent pas compte du calcul des incertitudes. L'accréditation COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation. Les déterminations accréditées réalisées en interne sont précédées du symbole Φ. Les déterminations précédées du signe 'pea' ont été confiées à un prestataire externe accrédité et sont couvertes par l'accréditation et celles précédées du signe 'pe' ont été confiées à un prestataire externe non accrédité. Ce rapport d'analyse ne concerne que l'échantillon soumis à l'analyse. Sa reproduction n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il ne doit pas être reproduit partiellement sans l'approbation du laboratoire. Echantillon conservé au laboratoire entre 2 et 5°C.

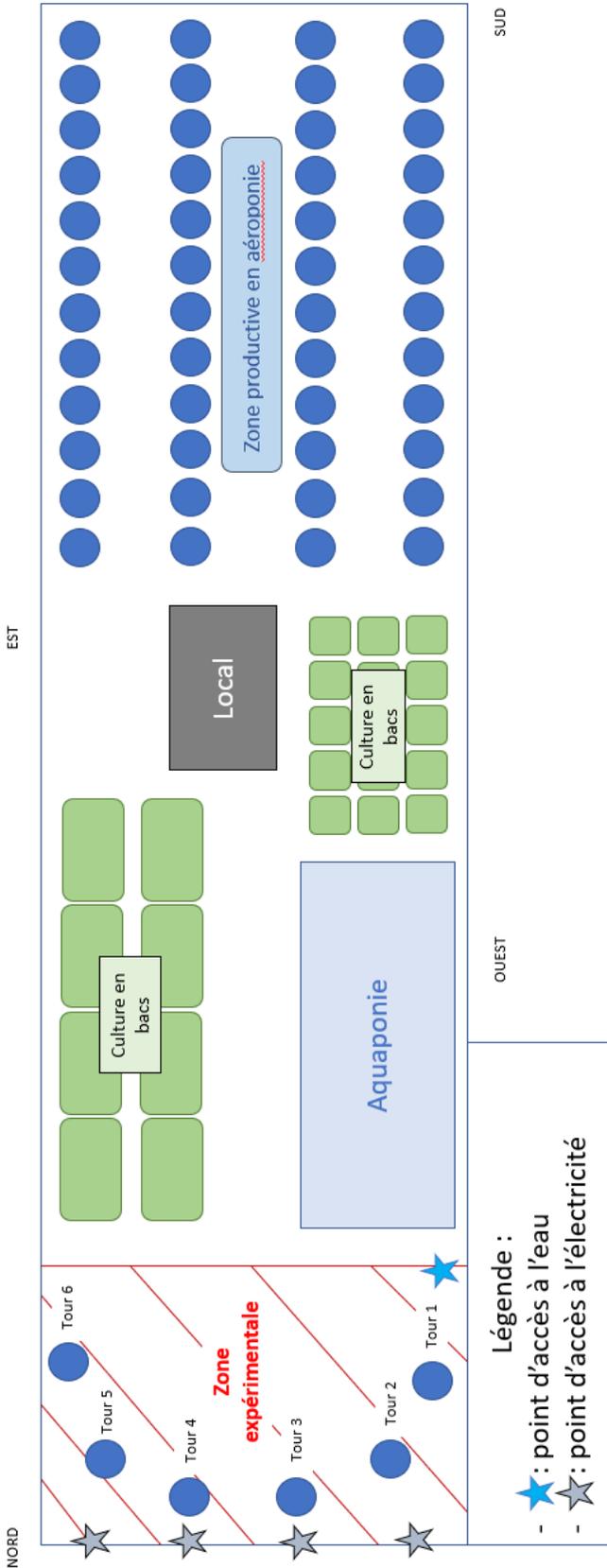
COFRAC DÉTERMINATIONS NORMES SYMBOLES & UNITÉS RÉSULTATS

PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES						
Physico-chimie de base						
Φ	Potentiel hydrogène		NF EN ISO 10523	pH	unité pH	3,4
	Température de mesure du pH		NF EN ISO 10523		°C	17,9
	Extrait sec (à 105 °C)		Méthode interne		mg/L	14711,8
Φ	Carbone organique total		NF EN 1484	COT	mg/L	12100
Φ	Azote total Kjeldahl		NF EN 25663	NTK	mg/L	3050
	Rapport C/N		Calcul			4,0
Φ	Azote ammoniacal		NF ISO 15923-1	NH4+	mg N/L	210
Φ	Phosphore total	(v)	NF EN ISO 11885	P	mg/L	210
Φ	Calcium	(v)	NF EN ISO 11885	Ca	mg/L	53
Φ	Magnésium	(v)	NF EN ISO 11885	Mg	mg/L	26
Φ	Potassium	(v)	NF EN ISO 11885	K	mg/L	600
Φ	Sodium	(v)	NF EN ISO 11885	Na	mg/L	780
Métaux et assimilés métaux						
	Bore	(v)	NF EN ISO 11885	B	µg/L	460
	Fer	(v)	NF EN ISO 11885	Fe	mg/L	< 0,20
Φ	Manganèse	(v)	NF EN ISO 11885	Mn	µg/L	< 20,00

Ce rapport est la version originale.
Les déterminations suivies de (v) ont fait l'objet d'une vérification interne.



Annexe VI : Plan du toit de Cuisine Mode d'Emploi(s), 3-5 Rue Albert Marquet 75020 Paris



(Source : Auteur)

Annexe VII : Tableau récapitulatif des données mesurées

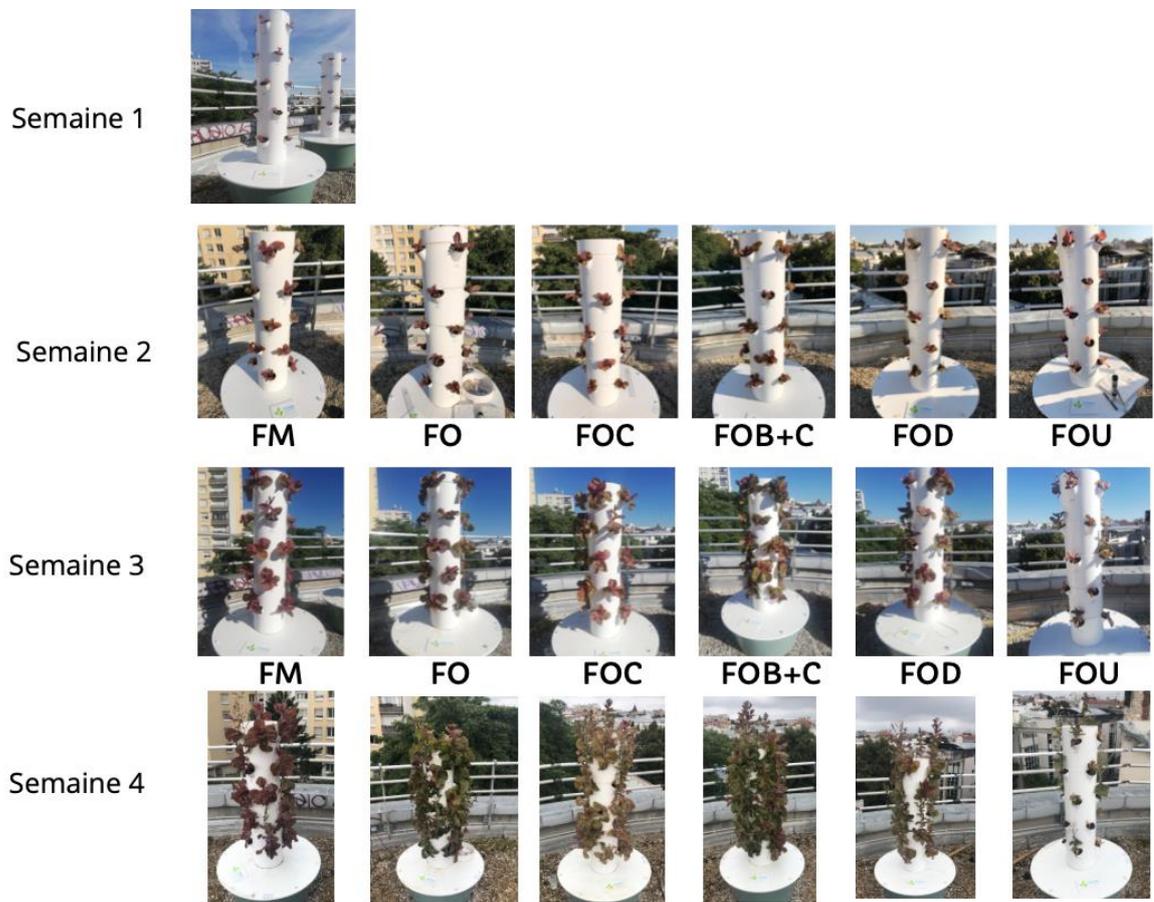
	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4
pH	xxx	xxx	xxx	xxx
EC	xxx	xxx	xxx	xxx
T_eau	xxx	xxx	xxx	xxx
Taille racinaire	x			x
Surface foliaire	x	x	x	x
RGR				x
Masse				x
Taux de mortalité				x
Taux de montaison	x	x	x	x

Annexe VIII : Exemple des deux premiers jeux de données

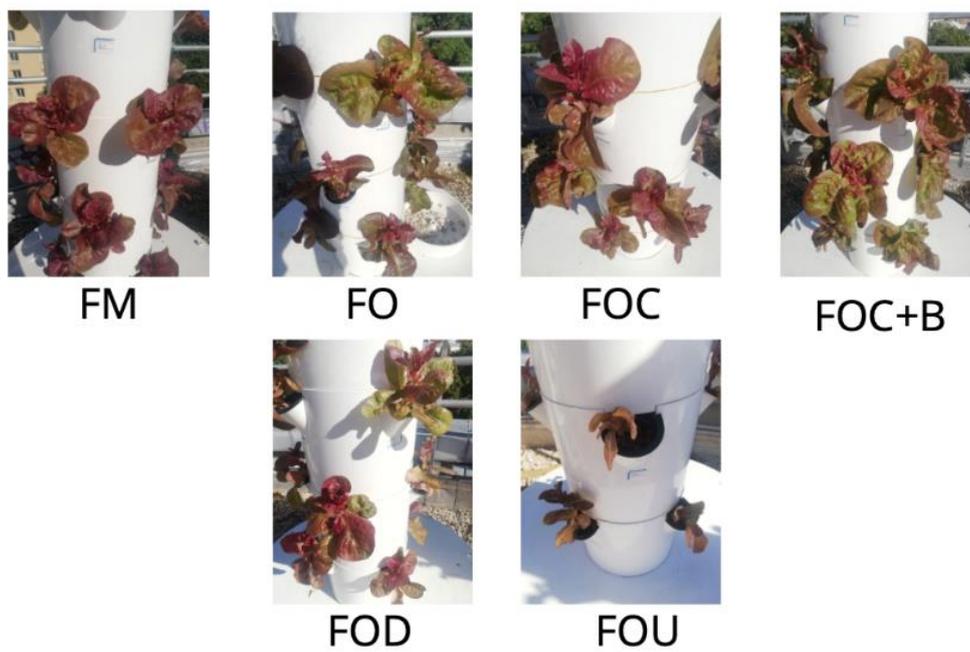
Plants	Type_fert	Diff_taille_rac	Semaine	Plants	Type_fert	surf_fol
1_A1	FM	12,2	1	1_A1	FM	10,34860834
1_A2	FM	16,5	1	1_A2	FM	10,55980443
1_A3	FM	13,6	1	1_A3	FM	6,019088524
1_A4	FM	22,2	1	1_A4	FM	8,500642565
1_B1	FM	7,4	1	1_B1	FM	9,609422203
1_B2	FM	12,6	1	1_B2	FM	3,69593155
2_A1	FO	9,7	1	1_B3	FM	8,095850062
2_A2	FO	11,2	1	1_B4	FM	7,946252833
2_A3	FO	15,8	1	1_C1	FM	10,11981258
2_A4	FO	11,4	2	1_A1	FM	13,92
2_B1	FO	5,9	2	1_A2	FM	16,8
2_B2	FO	12	2	1_A3	FM	11,55
3_A1	FOC	8,3	2	1_A4	FM	13,05
3_A2	FOC	7,7	2	1_B1	FM	9,9375
3_A3	FOC	12,6	2	1_B2	FM	11,25
3_A4	FOC	9,7	2	1_B3	FM	15,12
3_B1	FOC	13	2	1_B4	FM	11,505
3_B2	FOC	11,6	2	1_C1	FM	17,085
4_A1	FOC+B	15,6	3	1_A1	FM	40,86644314
4_A2	FOC+B	21,9	3	1_A2	FM	36,58972235
4_A3	FOC+B	18,9	3	1_A3	FM	39,62566612
4_A4	FOC+B	15,1	3	1_A4	FM	36,61612186
4_B1	FOC+B	17,7	3	1_B1	FM	24,59554448
4_B2	FOC+B	13,9	3	1_B2	FM	34,49536113
5_A1	FOD	4,7	3	1_B3	FM	42,63521038
5_A2	FOD	13,4	3	1_B4	FM	36,43132528
5_A3	FOD	6,8	3	1_C1	FM	43,11920142
5_A4	FOD	14,1	4	1_A1	FM	66,57956692
5_B1	FOD	11	4	1_A2	FM	85,00642565
5_B2	FOD	18,6	4	1_A3	FM	87,64637676
6_A1	FOU	0	4	1_A4	FM	84,52243462
6_A2	FOU	0	4	1_B1	FM	35,1993481
6_A3	FOU	2,2	4	1_B2	FM	81,53049003
6_A4	FOU	0	4	1_B3	FM	55,28937602
6_B1	FOU	0	4	1_B4	FM	70,39869619
6_B2	FOU	0	4	1_C1	FM	90,1983295

(Source : Auteur)

Annexe IX : Evolution de l'aspect visuel des salades

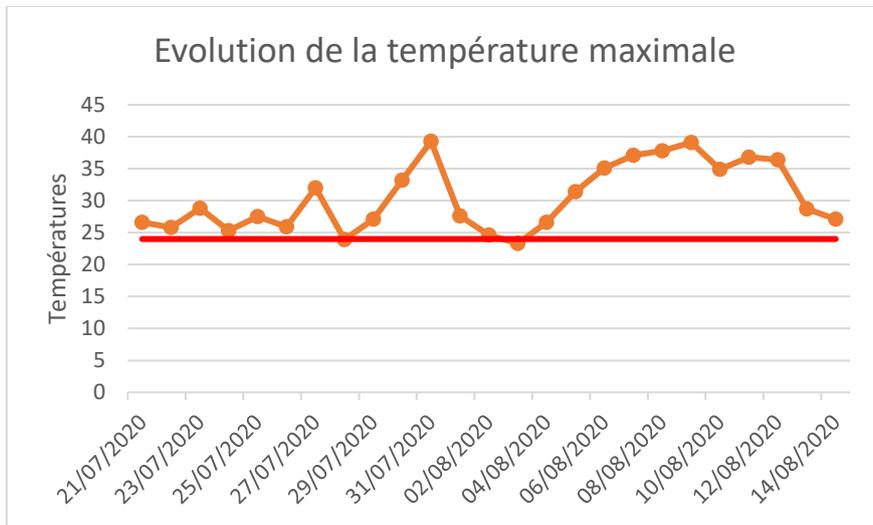


Semaine 3



(Source : Auteur)

Annexe X : Evolution de la température extérieure maximale durant toute l'expérimentation



Graphique de l'évolution de la température maximale durant toute l'expérimentation / Graph representing the evolution of the maximum temperature along the whole experimentation (Source : Auteur)

FICHE TECHNIQUE

Bactipi



BIOSTIMULANT A BASE D'INOCULUM DE BACTERIES

GRANDES CULTURES

COMPOSITION

Solution concentrée de *Lactobacillus sp.* sur support urine humaine

MECANISMES D' ACTIONS

- Meilleure assimilation des nutriments
- Meilleure résistance aux stress

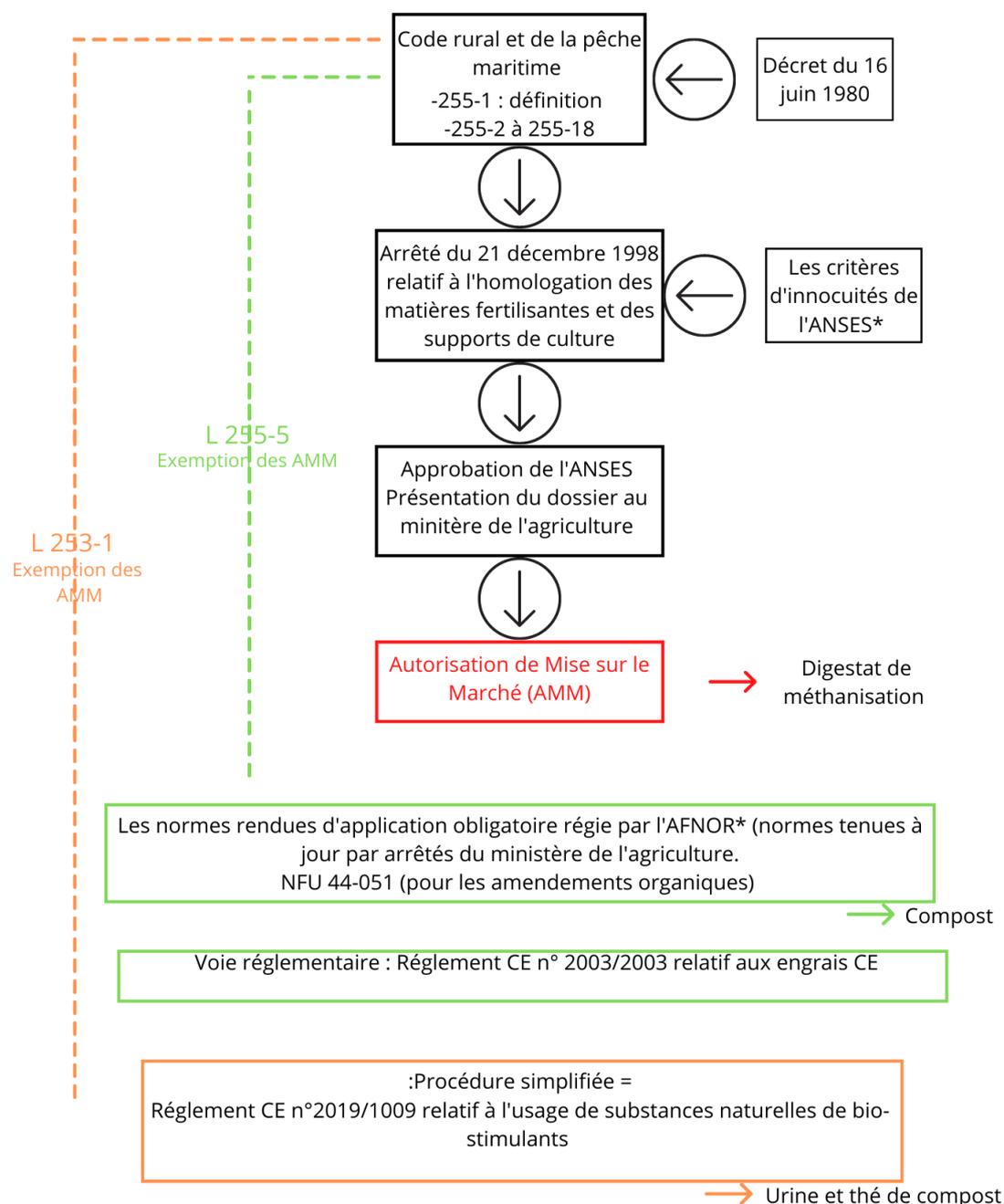


Les *Lactobacilles* sont capables de faciliter l'absorption des nutriments et de l'eau par les végétaux.



toopi

Clé de détermination simplifiée pour une autorisation de mise sur le marché



*ANSES : agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail

*AFNOR : association française de normalisation

(Source : Auteur)

Annexe XIII : Recycling of bio-waste in an urban environment for aeroponic lettuce production

1. Introduction

More and more cities are being planned to fight climate change (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme 2010) : indeed, many questions are emerging about the impact of human systems on the climate, but also about the effect of climate change on city dwellers. To respond to the pressure of climate issues on the current agri-food system (Mayol et Gangneron 2019), urban agriculture is increasingly developing. It is defined by the FAO in 1999 as "agricultural practices in and around cities that use resources (land, water, energy, labor) that can also be used for other purposes to meet the needs of the urban population" (Morel-Chevillet 2016).

Hydroponics generally characterizes soil-less cultivation (Mason 1996): one of the derivatives is aeroponics (root in suspension inside a tower, where the nutrient solution is sprayed) (« Cueillette Urbaine » 2020). There are two types of fertilizers in soil-less agriculture: a fertilizer is a product intended to ensure or improve plant nutrition or the physical, chemical and biological properties of the soil (Direction Générale des Entreprises 2017). Mineral fertilizers are made from non-renewable sources (Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt 2016), such as phosphate rock. Biopony, on the other hand, favours organic fertilisers that can be made from the reuse of bio-waste and is therefore fully anchored in an agro-ecological approach: designing a production system based on the functionalities offered by ecosystems, reducing pressure on the environment and preserving natural resources (Agriculture.gouv 2013).

The agroecological approach of biopony in urban agriculture is therefore totally in line with the circular economy (ADEME 2018): an economic system of exchange and production which, at all stages of the life cycle of products (goods and services), aims to increase the efficiency of resource use, reduce environmental impact and develop the well-being of individuals. The four main principles of the circular economy are: proximity to consumers, water recycling, waste recycling and finally the optimization of urban space (ADEME 2019). It is with these objectives in mind that the Cueillette Urbaine productive farm was created on the roof of Cuisine Mode d'emploi(s), a cooking school in the 20th arrondissement of Paris. The objective of the farm to become anchored in a local and sustainable circular economy is to source local organic fertilizers. The aim of the experiment is therefore to answer the following question: to what extent can fertilization based on organic products from the reuse of bio-waste be as effective as fertilization based on commercial mineral products?

In order to answer the main problem, the strategy will be as follows: test organic fertilizers, either from the reuse of bio-waste such as methanisation digestate, compost tea and urine, or already commercialised such as Biosevia, and compare their agronomic performance with that of Maxigro, a commercial mineral fertilizer. The experiment will be done in lettuce aeroponics cultivation. Statistical analyses will be carried out to differentiate the fertilizers according to the parameters of their nutrient solution, but also according to the growth parameters of the lettuce crop. Finally, an economic analysis as well as an elaboration on the standards to be respected for the marketing of organic fertilizers will allow to specify the choice of the most optimal fertilization.

Materials and methods

1.1. Equipment

- Experimental device

Salads were chosen for these tests: The Four Seasons Wonder Lettuce variety (Figure 1). Lettuce is inexpensive, easy to source, and widespread in biopony for its rapid growth (Mason 1996).

Aeroponics is a soil-less production system that can be described as a system where roots are continuously or discontinuously in an environment saturated with fine drops (a mist or aerosol) of nutrient solution (Lakhiar et al. 2018). The experimental design is as follows: six towers, composed of five floors, with four plants per floor. A tower has a closed water circuit, whose movement is maintained by a pump: it sends water to the top of the tower and makes the water run off the roots in the open air, oriented towards the center of the tower (figure 2). The plants are held by a rockwool support in a basket containing clay balls to maximize retention of the sprayed nutrient solution. The tower tanks are kept filled to 60L. A biofilter is positioned at the top of each tower containing an organic fertilizer to create a support for microorganisms, very present in biopony (Lee et Lee 2015). Indeed, the towers are devices that induce many biotic and abiotic interactions, concerning pH, EC, water temperature or bacterial populations.

Five fertilizers were used, which are summarized in Table 1:

Maxigro, commercial mineral fertilizer (label): control of the experiment, tower 1. Created by General Hydroponics Europe (GHE) (Culture Indoor s. d.), it is the most concentrated fertilizer: it is ideal for hydroponics and was therefore chosen as a control. Its composition is in appendix, it is coupled with a pH regulator.

Biosevia, organic commercial fertilizer (label), tower n°2. Also created by GHE, it is highly concentrated, and all its components are certified 100% organic. It is made up of beet vinasse, sugar cane and aloe (no other precisions have been made by GHE).

Compsot tea: tower n°3. Compost tea has phytoprotective and phytostimulant qualities (Maud Tragin - Astrédhor, s. d.) linked to the presence of micro-organisms. Les Alchimistes are specialized in recycling and valorization of urban bio-waste by transforming it into compost. They are located in Ile Saint-Denis, north of Paris. Their compost tea is made under anaerobic conditions: it is a fermentation, an infusion of 24 to 48 hours of a previously elaborated compost. The compost tea was chosen as a fertilizer to be tested because it appears only little in the literature concerning biopony: its agronomic value would be very interesting because of its local origin. The compost tea will therefore be tested alone in a tower as a fertilizer, but also in association with Biosevia in tower n°4. Indeed, it is declared as a good biostimulant, but the idea was also to test its fertilizing capacities only.

Digestion of methanization: tower n°5. The liquid phase of the digestate is one of the co-products released by the methanization units: it is therefore part of the reuse of biowaste (Service méthanisation-machinisme. Chambre d'Agriculture région Nord-Pas de Calais 2018). Its fertilizing character has not yet been tested in biopony, which is why it represents an avenue for further research. It is the methanization unit of the Beauval zoo that provided the digestate, because no other more local unit was available: it is produced from the biowaste of nearby farms, but also from the biowaste of the park (ADEME 2017).

Urine is the last tested organic fertilizer, in tower n°6. Indeed, most of the nitrogen fraction in urine is absorbed by the plant, comparable to urea or ammonium-based fertilizers,

with a nitrogen efficiency equal to 90% of that of a mineral fertilizer (Jönsson et al. 2004). Its effectiveness has thus been proven many times in the field, and only needs to be verified in aeroponics. The urine tested was designed by Toopi-organics (Toopi Organics s. d.): although the product supplied (Bactipi) corresponds to a biostimulant, its effectiveness as a fertilizer alone was nevertheless required by the technical director of Cueillette Urbaine, as it is once again the only product available for testing urine in soil-less culture.

- Measuring equipment

The equipment used is the following: a probe to measure electroconductivity (EC), a tape measure, a precision scale, a kitchen scale (5kg), graduated test tubes (50mL and 20mL), and a beaker with a capacity of 1L.

1.2. Method

1.2.1. *Setting up the experiment*

The experiment lasted four weeks, from July 21, 2020 to August 14, 2020, on a roof exposed to the sun throughout the day (appendix). Indeed, the issue of the experiment focused on whether or not it was possible to grow crops on this particular roof, to fit into a circular economy by selling the agricultural produce to the cooking school which was two floors lower.

In order to differentiate each plant, a code system was adopted and is shown in Figure 3.

1.2.2. *Method implemented to address the main issue*

The performance of each fertilizer was first evaluated agronomically, checking the stability of the nutrient solution in terms of pH, EC and water temperature. The threshold values were adapted to the physiological needs of the salad.

Stabilization of the nutrient solution is a very important criterion to be checked in biopony, as pH and EC variations are continuous in view of all interactions in the nutrient solution (General Hydroponics Europe s. d.). Therefore, pH values to be maintained between 5.5 - 6.5 (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017), up to 7 (Mason 1996), EC to be maintained between 0.8 and 1.2 mS/cm (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017) and water temperature to be maintained between 12 and 20°C (Mason 1996) (not to exceed 25°C) were verified. Stabilization of EC can be achieved by adding water (up to the 60L line) or pre-selected doses of fertilizer (Benton Jones 2014). Indeed, the EC value indicates the presence of ions in the solution. pH stabilization is more complicated in bioponics than in hydroponics because arbitrary regulations in bioponics prohibit the use of certain pH stabilizers (they could negatively impact the prosperity of the microorganisms in the solution (Katsuwon et Anderson 1992).

The pH, EC and water temperature data were therefore taken at the beginning of the experiment in each tower to adjust the first doses of fertilizer (doses given progressively in an empirical way). The readings were then taken three times a week. Graphs of the evolution of the EC, pH and water temperature values were made using excel to evaluate the stability of the nutrient solution throughout the experiment.

The agronomic performance of the fertilizers was also determined by comparing several growth factors (Katsuwon et Anderson 1992): the mass at harvest, the increase in root size and leaf area will be particularly explained. Leaf area has been calculated by developing a shape coefficient (Ruguet, Bonhomme, et Chartier 1996) and thus the following formula: $L_{max} * I_{max} * s$ with s the shape coefficient, L_{max} the maximum length of the measured leaf, I_{max} the maximum width. An average of all leaf areas per plant was calculated once a week. Root size is also a good indicator of plant growth in aeropony because the larger the root size, the

better the quality of the crop (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017). Being a destructive method, only the beginning and end root sizes were measured, and a difference was calculated. Finally, the harvested mass was weighed per tower (mass of all salads).

The data tables concerning the influence of fertilizers on the increase of root size on the one hand (table 4), and on the leaf area on the other hand (table 5) have been made and processed with the R software. Statistical models for the two variables were also constructed, of the form $Y_i = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$: the objective was to be able to differentiate fertilizers significantly according to these two variables. Thus, the H_0 hypotheses asserted that there was no influence of fertilizers on the increase in root size on the one hand, and on the leaf area on the other hand. Finally, the representation of the leaf area over time was plotted for each fertilizer: verification of the exponential shape of the leaf area (Jung et al. 2016) and comparison of the shape of the curves.

2. Results

2.1. Stability of the nutrient solution

Based on the graphs of the values of EC, pH and water temperature evolution, it is possible to affirm that the EC remained globally stable during the whole experiment (figure 6), except for tower n°6. Indeed, a significant drop in the EC value was observed on July 27th (0.75 mS/cm against 1.1 mS/cm two days before). It correlates with the drop in the nitrogen concentration on the same date (Figure 13). The pH values (Figure 7) changed significantly but still around 7.5. As for the water temperature (figure 8), it increased significantly towards the end of the experiment, and exceeded the value of 25°C. This is related to the variation in the outside temperature (Figure 9) which was very significant in August 2020.

2.2. Analysis of growth factors

The mass harvested from tower n°4 is much higher (1500g) than the other towers (figure 12), not exceeding 900g: it is therefore the combination of Biosevia and compost tea that seems to be the best fertilization concerning this variable.

The hypothesis of normality of the residues ϵ_{ij} was validated for each of the tests, which therefore showed interesting results: for root size (Figure 17) as well as for leaf area (Figure 19), it was again the association of Biosevia with compost tea that gave the best results. An increase in root size of almost 3 cm more than those of tower n°1, and a leaf area on average 12 cm² larger than for the salads of tower n°1. Finally, the representations of leaf area as a function of time for each fertilizer follow an exponential pattern, except for tower n°6 (figure 21). This result, combined with the leaf area growth table (Table 7), leads to the conclusion that Biosevia combined with compost tea is the best fertilizer (the error bars with standard deviation values overlap, so only a trend is observed).

3. Interpretation and discussion

3.1. Interaction of abiotic factors with each other and with growth parameters

Culture in bioponics leads to very numerous interactions and the variations in pH and EC are continuous and difficult to stabilize (Domingues et al. 2012). Interactions occur between abiotic factors, but also on physiological and growth parameters. They are represented here by pH, EC, water temperature concerning the nutrient solution, and air temperature and sunshine concerning the external part of the device. Indeed, the influence of external factors

was very important in view of the high heat: the water temperature was therefore directly impacted. However, EC and pH interact with the latter (Cometti et al. 2013) and their too important variation leads to modifications in the photosynthetic performance of the plant and thus on the mass production harvested. Indeed, lettuce bolting occurs when it is subjected to nutrient solution temperatures above 25°C (Gopinath, Vethamoni, et Gomathi 2017) for example.

3.2. Very low values of growth parameters related to urine-based fertilization

Variations in EC and water temperature may therefore be the cause of the large growth delay observed in urine-based salads. Indeed, it is this fertilizer that led to the worst values for root size and leaf area (respectively -11 cm root size compared to the control, and -18 cm² leaf area). This result can be explained by the nature of the fertilizer used: the Bactipi product is a biostimulant and is therefore not supposed to be used alone. However, this does not seem to be the only reason, since compost tea being a biostimulant too, the results were not catastrophic concerning its use alone in tower n°3. The most likely reason would be the very high variation of the EC and the concentration of nitrogen supplied for tower n°6: indeed, a nitrogen deficiency implies an important delay in growth and apparently stunted plants (Foucard et Toqueville 2019). A shortage of fertilizer during the experimentation took place due to the important delivery delays at this time (linked to the Covid-19 epidemic). Another test on urine-based fertilization would therefore be very interesting to carry out.

3.3. An economic analysis

The performance of each fertilizer is also to be analysed from an economic point of view. Their profitability is crucial when their use is intended for large productive farms. Indeed, the prices of each fertilizer were obtained on site for commercial fertilizers, and directly from suppliers for organic fertilizers from bio-waste. The price of the urine-based fertilizer could not be obtained but will be available soon, since the product is expected to be on the market in 2021. The total production cost for each tower was calculated (Table 10): currently, with the price estimates by the suppliers, compost tea appears to be the most expensive fertilization (535€ versus 501€ for the Maxigro-based tower). However, as its biostimulant action has been verified, it would be used in smaller quantities, ideally combined with another organic fertilizer from bio-waste recycling. The higher prices of the latter are linked to the fact that their marketing is still slowed down: once authorized for sale, they will be more available, and their price will drop. It is nevertheless necessary to remember that the sale of these bio-waste-based products is still preferable in a local way, to be part of a fully sustainable circular economy.

3.4. Regulatory analysis of organic fertilizers from bio-waste

The performance of fertilizers is also linked to their availability on the market. The determination key available in the appendix groups together all the possibilities to obtain the marketing of a product resulting from the reuse of bio-waste. The methanization digestate can be used in open fields in compliance with the spreading plan of the Nitrate Directive (Chambre d'Agriculture, Ile-de-France s. d.). On the other hand, to sell it as a fertilizer product, methanization units must comply with the approval procedures and obtain a Marketing Authorization (MA) (A.I.L.E 2015). Few units have managed to obtain it, but it is not impossible.

Bactipi is already compliant with the EC 2019/1009 regulation and is expected to be on the market in 2021. Since compost tea is also a biostimulant, it could follow the same path and obtain an MA. As the latter is well highlighted by the agronomic results, it is therefore very

encouraging to place it at the centre of a developing circular economy in the urban environment.

5. Conclusion and outlook

5.1. Response to the main problem

The experiment was carried out within the framework of an agroecological approach of Cueillette Urbaine, and aimed to determine to what extent a fertilization based on organic products from the reuse of bio-waste can be as efficient as a fertilization based on commercial mineral products. The comparison was therefore made on several aspects: agronomic, economic, ecological, and regulatory. Thus, commercial fertilizers are the most concentrated, but it is not Maxigro that seemed the most effective: it is indeed the combination of Biosvia and compost tea that seemed the most effective. On the other hand, Biosevia is not a fertilizer resulting from the reuse of local bio-waste, so it would be interesting to test the biostimulant effect of compost tea on an organic fertilizer resulting from the reuse of urban bio-waste in order to anchor the Cueillette Urbaine farm in a perfect circular economy and to detach itself from its dependence on synthetic organic fertilizers. Moreover, organic fertilizers from bio-waste are less concentrated and must therefore be put on the market in larger quantities: production costs appear to be higher, especially for compost tea, but the marketing, although tedious, is accessible. Estimated prices will certainly change, quantities will be greater, and fertilizers will be more available for urban farms wishing to enter into an advanced circular but still local economy.

5.2. Outlook for the future

Urban agriculture projects still work a lot on an individual basis (Morel-Chevillet 2016): they are just waiting to be linked to the metabolism of cities. Indeed, urban waste management, innovation in cultivation and marketing systems, or even space optimization are all areas that can be anchored, thanks to urban agriculture, in a collective and sustainable dynamic in the urban environment.

Social ties are also extremely important and can contribute to the creation of a resilient human society (Mayol et Gangneron 2019). The eco-responsible dimension of urban farms could also be developed (Morel-Chevillet 2016): waste management in cities could be taken care of in its entirety. Indeed, intra-urban farms would be in charge of waste collection, and peripherals could transform them into organic fertilizers for urban agricultural production.

 <small>agriculture • alimentation • environnement</small> 	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronomie Spécialisation / option : Agroecology Enseignant référent : Edith Le Cadre
Auteur(s) : Eloïse GROUD Date de naissance* : 12/08/1997	Organisme d'accueil : Cueillette Urbaine Adresse : 5 Parvis Alan Turing, 75013 Paris
Nb pages : 123 Annexe(s) : 12	
Année de soutenance : 2020	Maître de stage : Pierre-Frédéric Bouvet
Titre français : Revalorisation des biodéchets en milieu urbain pour une culture de salade en aéroponie Titre anglais : Recycling of bio-waste in an urban environment for aeroponic lettuce cultivation	
Résumé (1600 caractères maximum) : La nécessaire inscription d'une agriculture urbaine durable et locale incite de plus en plus à la réutilisation des biodéchets en culture hors-sol. Pour s'inscrire dans une économie circulaire sans précédent, la bioponie favorise la fertilisation organique et semble pouvoir se substituer parfaitement aux fertilisants minéraux de synthèse, issus de sources non renouvelables. L'objectif est donc de déterminer dans quelles mesures les fertilisants organiques issus de la réutilisation de biodéchets peuvent être aussi performants que les fertilisants minéraux commerciaux. Pour cela, un test de quatre fertilisants organiques (avec témoin minéral) sur une culture de salade en aéroponie est réalisé et plusieurs aspects sont étudiés. Il s'agit de comparer les fertilisants d'un point de vu agronomique, grâce à des mesures de surface foliaire et de taille racinaire, mais aussi économique, écologique et réglementaire. C'est l'association du thé de compost avec le Biosevia (fertilisant organique commercial) qui ressort comme la meilleure fertilisation : une croissance racinaire et une surface foliaire respectivement de 3 cm et de 12 cm ² plus grandes que celles de ce dernier. Le thé de compost apparait comme un excellent biostimulant, intéressant par la suite à tester sur des fertilisants organiques issus de biodéchets. Les analyses économiques et réglementaires laissent à penser que la mise sur le marché locale de ce type de fertilisants permettrait leur usage plus aisé et la réduction leur prix de vente : une intégration optimale à l'économie circulaire en milieu urbain.	
Abstract (1600 caractères maximum) : The necessary inclusion of sustainable and local urban agriculture encourages more and more the reuse of bio-waste in soil-less culture. To be part of an unprecedented circular economy, biopony favours organic fertilization and seems to be a perfect substitute for synthetic mineral fertilizers from non-renewable sources. The objective is therefore to determine to what extent organic fertilizers derived from the reuse of bio-waste can be as effective as commercial mineral fertilizers. For this purpose, a test of four organic fertilizers (with one mineral control) on an aeroponic lettuce crop is carried out and several aspects are studied. The aim is to compare the fertilizers from an agronomic point of view, thanks to leaf area and root size measurements, but also from an economic, ecological and regulatory point of view. It is the association of compost tea with Biosevia (commercial organic fertilizer) that emerges as the best fertilization: root growth and leaf area are respectively 3 cm and 12 cm ² higher than the latter. Compost tea appears to be an excellent biostimulant, interesting to test on organic fertilizers from bio-waste. Economic and regulatory analyses suggest that the local marketing of this type of fertilizer would make it easier to use and reduce its selling price: an optimal integration into the circular economy in urban areas.	
Mots-clés : Agriculture urbaine ; Bioponie ; Aéroponie ; Fertilisant organiques ; Economie circulaire Key Words: Urban agriculture ; Bioponics ; Aeroponics ; Organic fertilizers ; Circular economy	

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