

Etude de l'emploi du thé de compost et de fientes de poules comme fertilisants pour la bioponie dans la ville d'Antananarivo

Auteur : Imbonimadana, Annie Patricia

Promoteur(s) : Jijakli, Haissam

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master de spécialisation en production intégrée et préservation des ressources naturelles en milieu urbain et péri-urbain

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16575>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ETUDE DE L'EMPLOI DU THE DE COMPOST ET DE FIENTES DE POULES COMME FERTILISANTS POUR LA BIOPONIE DANS LA VILLE D'ANTANANARIVO

IMBONIMIADANA ANNIE PATRICIA

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN PRODUCTION INTEGREE ET PRESERVATION DES RESSOURCES
NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET PERI-URBAIN**

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR: HAISSAM JIJAKLI

Copyright : « Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech. Le contenu du présent document n'engage que l'auteur ».

ETUDE DE L'EMPLOI DU THE DE COMPOST ET DE FIENTES DE POULES COMME FERTILISANTS POUR LA BIOPONIE DANS LA VILLE D'ANTANANARIVO

IMBONIMIADANA ANNIE PATRICIA

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN PRODUCTION INTEGREE ET PRESERVATION DES RESSOURCES
NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET PERI-URBAIN**

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR: HAISSAM JIJAKLI

REMERCIEMENTS

Mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué à la finalisation de cette étude, notamment :

- **Professeur Jijakli HAISSAM**, responsable du Master en Production Intégrée et Préservation des Ressources Naturelles en milieu urbain et péri-urbain (PPRN) et promoteur de ce travail. Vous avez accepté, dès le début, encadrer mon travail et m'intégrer dans votre unité de recherche. Veuillez recevoir, Professeur, l'expression de ma profonde gratitude.
- **Iris Szekely**, co-promoteur de ce travail. Votre disponibilité, votre esprit d'écoute et vos conseils pertinents ont permis l'amélioration de la qualité de ce travail. Veuillez recevoir toute ma sympathie et ma reconnaissance.
- **Tous les professeurs du Master PPRN**, merci pour votre dévouement à nous donner une bonne formation. Recevez toute ma reconnaissance.

J'adresse également mes vifs remerciements :

- *envers l'ARES (l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur de la Belgique) pour le financement de notre formation en Belgique.*
- *les membres du jury qui auront à évaluer ce travail et à l'améliorer à travers leurs critiques et suggestions constructives.*
- *A ma famille et à tous mes proches ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

Que ceux que je n'ai pas pu citer ici veuillent bien m'excuser et qu'ils puissent trouver dans cet ouvrage, l'image de leur contribution et ma sincère gratitude.

Un grand Merci à tous !

TABLES DES MATIERES

1.	Introduction	1
2.	Contexte et problématique.....	2
3.	Objectifs de l'étude	3
	Partie.1. Etat des connaissances	3
I.1.	Hydroponie.....	4
I.1.1.	Différents systèmes de culture hydroponique	4
I.1.2.	Les différents substrats utilisés en hydroponie.....	6
I.1.3.	Nutrition des plantes en hydroponie.....	7
I.1.3.1.	L'azote.....	7
I.1.3.2.	Le phosphore.....	10
I.1.3.3.	Le potassium	11
I.1.4.	Gestion de la solution nutritive	12
I.1.4.1.	Niveau de pH en hydroponie.....	12
I.1.4.2.	Valeur de l'électro conductivité	13
I.1.4.3.	Température et oxygénation de l'eau	14
I.2.	Bioponie	14
I.3.	Principe de production du thé.....	15
Partie.2.	Hypothèse de recherche et les points focus du travail.....	18
Partie.3.	Matériels et méthodes.....	18
III.1.	Le site expérimental pour la culture hydroponique	18
III.2.	Essai de production de solution nutritive	18
III.2.1.	Préparation de la solution nutritive SA à base d'engrais soluble	19
III.2.2.	Préparation des solutions nutritives SB et SC à base de thé de compost oxygéné 20	
III.2.2.1.	Détermination de la matière sèche	20
III.2.2.2.	Mode de préparation de l'infusion du thé de compost	20
III.2.2.3.	Filtration du thé de compost.....	21
III.2.2.4.	Détermination de la durée d'infusion optimale.....	21
III.2.2.5.	Détermination de la concentration d'infusion optimale	23

III.3.	Essai de production de laitues biponiques	23
III.3.1.	Dispositif expérimental	24
III.3.2.	Description du système hydroponique utilisé	24
III.3.3.	Matériel végétal à tester	26
III.3.4.	Germination des laitues.....	26
III.3.5.	Transplantation des laitues.....	26
III.4.	Collecte de données.....	26
III.4.1.	Suivis de la solution nutritive pendant la période de culture de laitues	26
III.4.2.	Suivis phénologiques des laitues.....	26
III.4.3.	Evaluation de la production conventionnelle de laitues en milieu urbain.....	27
III.5.	Traitement des données	27
Partie.4.	RESULTATS	28
VI.1.	Evaluation de la qualité des thés de compost et la durée d'infusion optimale	28
IV.1.1.	Résultats du premier essai de production de thé de compost de dosage 10%.....	28
IV.1.1.1.	Evolution du pH lors du premier essai	28
IV.1.1.2.	Evolution de l'EC lors du premier essai.....	29
IV.1.2.	Conclusion du premier essai de production de thé.....	30
IV.1.3.	Caractéristiques des thés SB-2 et SC-2 produits lors du deuxième et troisième essai	30
VI.2.	Essais de production des laitues	32
IV.2.1.	Evolution du pH durant la phase de culture des laitues	32
IV.2.2.	Evolution de l'EC durant la phase de culture des laitues	34
VI.3.	Evaluation de la croissance des plantes.....	36
IV.3.1.	Hauteur des plantes	36
IV.3.2.	Nombre des feuilles.....	38
VI.4.	Analyse de la rentabilité économique du système de culture biponique	41
Partie.5.	DISCUSSIONS	44
V.1.	Dosage et durée d'infusion du thé de compost.....	44
V.2.	Evolution du pH durant la phase de culture	45

V.3.	Evolution de l'EC durant la phase de culture.....	46
V.4.	Effet des thés de compost sur la croissance et rendement des laitues	46
V.5.	Rentabilité économique de la production bioponique	47
4.	Conclusion.....	47
	ANNEXES.....	50
	Annexe.1. Seuil de détection du test colorimétrique JBL (ppm).....	50
	Annexe.2. Evolution des nutriments lors du premier essai de production de thé.....	50
	Annexe.3. Caractéristiques des thés SB-2 et SC-2 produits lors du deuxième et troisième essais	52
	Annexe.4. Evolution du teneur en azote durant la phase de culture des laitues	53
	Annexe.5. Valeurs d'écart-type pour les courbes d'évolution de l'EC pendant le premier et deuxième essai de culture de laitues.....	54
	Annexe.6. Evolution de la moyenne des températures de l'eau durant la première phase de culture des laitues	54
	Annexe.7. Evolution de la moyenne des températures de l'eau durant la deuxième phase de culture des laitues	55
	Annexe.8. Résultats du test de Tukey sur la masse foliaire fraîche du premier et deuxième essai de culture de laitue	55
	BIBLIOGRAPHIE	56

LISTE DES FIGURES

Figure.1. Les principaux substrats utilisés en culture hydroponique (Gruda et al. 2006 cité dans FAO, 2013).....	6
Figure.2. Relation entre la biodisponibilité du phosphore et le pH du sol (Graeme A. et al., 2019)..	11
Figure.3. Diagramme d'assimilation des minéraux en fonction du pH (Bugbee B., 2003 in manicbotanix).....	12
Figure.4. Différents types de solution nutritive testés	18
Figure.5. Préparation de la solution nutritive chimique SA.....	19
Figure.6. Préparation d'infusion de thé de compost	21
Figure.7. Premier essai de production de thé.....	22
Figure.8. Les kits d'analyse utilisés (gauche : Testeur EC /pH (Flintronic), droite : JBL aquatest) ..	23
Figure.9. Système de culture RAFT installé.....	25
Figure.10. Evolution du pH durant l'infusion- Essai n°1	29
Figure.11. Evolution de l'EC durant l'infusion-Essai n°1	29
Figure.12. Valeurs de pH des solutions produites lors de second et troisième essai	31
Figure.13. Valeurs de l'électro conductivité des solutions produites lors de second et troisième essai	32
Figure.14. Evolution du pH pendant le premier essai de culture de laitues.....	33
Figure.15. Evolution du pH avant ajustement au cours du deuxième essai de culture de laitues.....	34
Figure.16. Evolution du pH après ajustement, au cours du deuxième essai de culture de laitues	34
Figure.17. Evolution de l'EC au cours du premier essai de culture de laitues	35
Figure.18. Evolution de l'EC avant ajustement du pH au cours du second essai de culture de laitues.....	36
Figure.19. Evolution de la hauteur des laitues au cours du premier essai de culture.....	37
Figure.20. Evolution de la hauteur des laitues au cours du second essai de culture.....	38
Figure.21. Evolution du nombre de feuilles des laitues au cours du premier essai de culture	39
Figure.22. Perte des feuilles après renouvellement de la moitié des solutions nutritives.....	39
Figure.23. Evolution du nombre de feuilles des laitues au cours du second essai de culture	40
Figure.24. Taille des laitues obtenue au cours du deuxième essai de culture.....	40
Figure.25. Masse foliaire fraiche des laitues au cours du premier et second essai de culture	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1.	Les principaux systèmes hydroponiques et leurs caractéristiques (Nguyen et al., 2016)	5
Tableau2.	Valeurs de pH et EC pour certaines cultures hydroponiques (Sardare et al., 2013)	13
Tableau3.	Qualité nutritive de différents thés	17
Tableau4.	Composition d'une solution nutritive conventionnelle (mg/l) pour une culture de laitues hydroponiques (Cometti et al., 2013).....	17
Tableau5.	Concentration en minéraux de la solution nutritive SA préparée.....	19
Tableau6.	Modalités de thés testés pour l'essai de production de laitues	24
Tableau7.	Récapitulatif des hauteurs de plantes au cours du premier essai de culture	37
Tableau8.	Récapitulatif des hauteurs de plantes au cours du deuxième essai de culture ...	38
Tableau9.	Récapitulatif du nombre de feuilles par plante au cours du premier essai de culture	38
Tableau10.	Récapitulatif du nombre de feuilles par plante au cours du deuxième essai de culture	39
Tableau11.	Coût du système RAFT	42
Tableau12.	Evaluation de la rentabilité économique des modes de culture de laitues conventionnel et hydroponique	43

LISTES DES SIGLES ET ABREVIATIONS

% : Pourcentage	NH_4^+ : Ion Ammonium
°C : Degrés Celcius	NH_3 : Ammoniaque
μ s : Micro simens	NO_2^- : Nitrite
EC : Electro conductivité	NO_3^- : Nitrate
g : Gramme	pH : Potentiel hydrogène
Kg : Kilogramme	MS : Matière sèche
KWH : KiloWatt-Heure	MF : Matière fraîche
L : Litre	m^2 : Mètre carré
m : Mètre	mg : Milligramme
RAFT : Culture sur radeaux flottants	NFT : Nutrient Film Technique

RESUME

La culture hydroponique pourrait être l'une des solutions techniques pour assurer une sécurité alimentaire face aux enjeux de l'urbanisation et les pollutions que subissent les terres agricoles. En utilisant de l'engrais organique, le système de culture hydroponique est plus écologique, et dans ce cas il est appelé bioponie. Le présent travail se focalise sur l'étude de l'emploi du thé de compost et de fientes de poules comme fertilisants pour la bioponie dans la ville d'Antananarivo. Une première production de thé oxygéné à base de compost de déchets municipaux et un mélangé avec 25 % de fientes de poules a démontré que trois jours est la durée optimale d'infusion. Ensuite, un deuxième essai de production des deux types de thé a comparé trois concentrations différentes de matière fraîche (10%, 20% et 40%) afin de déterminer le dosage d'infusion optimale. Il ressort de cet essai que le dosage de 40% en matière fraîche permet d'atteindre une solution nutritive à 1500 µS/cm d'EC favorable à la culture de laitue.

En ayant comparé les deux thés (compost seul et celui mélangé avec 25% de fientes de poules) de concentration de 20% en matière fraîche avec une solution témoin d'engrais soluble 1g/L pour cultiver de laitues sur un système hydroponique RAFT avec substrat mâchefer, il ressort que toutes les plantes sont fanées au bout de 36 jours. Au cours de cet essai, le non-ajustement du pH à 6,5 et le renouvellement de la moitié de la solution nutritive au 18^{ème} jour ont empêché l'augmentation de l'EC jusqu'à dépasser les 2000µS/cm.

Un deuxième essai de production de laitues démontre l'avantage de l'ajustement de pH des solutions nutritives à 6,5 tous les deux jours. Les plantes ont toutes accompli leur développement au cours de cet essai. C'est le thé de compost mixé aux fientes de poules et à concentration 40% de MF (SC-3) qui a obtenu le rendement le plus élevé après 30 jours de transplantation, avec une moyenne de masse foliaire fraîche de $92 \pm 3,90$ g contre $61 \pm 4,36$ g pour SB-3 (thé de compost seul à 40% de MF) et $60 \pm 3,85$ g pour SA-3 (solution nutritive inorganique 4g/l).

Les deux essais de culture de laitues effectués ont aussi permis de constater que la vitesse de croissance des laitues cultivées sur le thé de compost (SB) et le mix avec fientes de poules (SC) est supérieure à celle issue de la solution nutritive inorganique (SA). Cela est probablement expliqué par la présence de phyto-hormone dans la matière organique des thés. Toutefois, le rendement maximum obtenu par le thé de compost mixé aux fientes de poules (SC-3) ne dépasse pas encore celui de la culture sur terre selon les résultats d'enquête auprès de 6 maraîchers. Après une analyse économique, il s'avère que le système de culture bioponique utilisant le thé de compost mixé aux fientes de poules offre une rentabilité économique plus élevée qu'une culture sur terre dont les charges de production sont effectivement plus chères.

Mots clés : bioponie, thé de compost, fientes de poules, laitue

ABSTRACT

Hydroponic system could be one of the technical solutions to ensure food security in face of urbanization and agricultural land pollution. By using organic fertilizers, hydroponic system is more ecological and in this case is called bioponic. The present work focuses on the use of compost tea and chicken manure as fertilizers for bioponic system in the city of Antananarivo. An initial production of oxygenated tea based on municipal waste compost and a mixture with 25% chicken manure showed that three days is the optimal brewing time. Then, a second production trial of both types of tea compared three different concentrations of fresh matter (10%, 20% and 40%) to identify the optimal brewing concentration. From this trial, it was found that the 40% fresh matter concentration allows to get a nutrient solution with 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ EC which is suitable for lettuce cultivation.

By comparing the two teas (compost alone and the mixed with 25% chicken manure) having 20% fresh matter concentration with an inorganic control solution (1g/L soluble fertilizer) to grow lettuce in floating RAFT hydroponic system with clinker substrates, results indicated that all plants died 36 days after transplanting. In this trial, EC exceeded 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ because the pH was not adjusted to 6.5 and half of nutrient solution was renewed on the 18th day, which increased mineralization of organic molecules.

A second lettuce production trial demonstrates the benefit of adjusting the pH of nutrient solutions to 6.5 every other day. All plants developed during this trial. Thirty days after transplanting, Compost tea mixed with chicken manure and with a concentration of 40% MF (SC-3) yielded the greatest aboveground wet mass with aboveground fresh weight of $92 \pm 3.90\text{g}$ against $61 \pm 4.36\text{g}$ for SB-3 (compost tea alone with 40% MF) and $60 \pm 3.85\text{ g}$ for SA-3 (4 g/l inorganic nutrient solution).

In the two lettuce culture trials conducted, it was found that the lettuce growth rate on compost tea (SB) and the mixed with chicken manure (SC) was higher than of the inorganic nutrient solution (SA). This is probably explained by the presence of phyto-hormone in the organic matter of teas. However, the maximum yield obtained by compost tea with chicken manure (SC-3) does not yet exceed that of field-grown crops according to the survey of six farmers. An economic analysis showed that the bioponic system using compost tea mixed with chicken manure offers higher economic profit than a field-grown crop whose production is more expensive.

Keywords: bioponic, compost tea, chicken manure, lettuce

1. Introduction

Les défis mondiaux concernant l'explosion de la croissance démographique et le changement climatique affectent la sécurité alimentaire. Il est estimé qu'en 2050, le défi sera de nourrir 11 milliards de personnes dans le monde, dont 70% résideront en zones urbaines, ce qui nécessitera de doubler la production agricole mondiale (ONU, 2018). Des préoccupations sur l'utilisation durable des ressources de la planète sont parallèlement évoquées car l'agriculture conventionnelle basée sur le principe de l'utilisation intensive des produits agrochimiques ne saurait garantir la durabilité des agroécosystèmes. Pour pallier ces problèmes, les recherches des techniques et des intrants agricoles efficents et respectueux de l'environnement sont rapidement développées (Gonella et al., 2021). Elles sont combinées à des objectifs de réduction de la pression foncière de l'agriculture, d'amélioration de la conservation de la biodiversité et de maximisation du rendement agricole. Dans ce contexte, la technique de culture sans sol appelée « hydroponie », utilisant une solution nutritive pour alimenter les racines des plantes, est appliquée pour surmonter certains problèmes liés à la culture en terre tels que les ravageurs, la pollution, l'épuisement de la fertilité du sol, le changement climatique et la rareté d'espace ainsi que pour améliorer le rendement agricole (Savvas D et Gruda N, 2018).

Toutefois, les techniques de cultures hydroponiques, en vogue actuellement, possèdent des contraintes environnementales liés à l'utilisation des intrants chimiques comme le substrat et la solution nutritive ainsi que la consommation élevée en énergie pour son fonctionnement (Dumitrescu, 2013); et des contraintes économiques par rapport à l'accès aux engrains minéraux notamment dans les pays en développement (Salas, 2012). Pour être plus écologique, des alternatives sont apportées dans la pratique de l'hydroponie notamment sur les types d'intrants tels que l'utilisation des substrats et engrais biologiques. Le système hydroponique utilisant une solution nutritive biologique est décrit comme la bioponie (Texier, 2013). L'utilisation des matériaux disponibles localement en culture bioponique tient aussi un rôle important pour favoriser le processus d'économie circulaire (Barrett et al. , 2016).

La présente étude met un accent particulier sur l'importance de la conversion du mode de culture conventionnel des laitues en culture bioponique face à l'urbanisation de la ville d'Antananarivo afin de proposer un système de production low-tech adapté aux maraîchers locaux. L'étude se focalise sur la production d'une solution organique à base de compost et un mix avec des fientes de poules, puis la tester sur une culture de laitues. Après cette partie introductory, cet ouvrage débutera par le contexte local et les objectifs de la réalisation de l'étude. S'en suivra, le premier chapitre sur l'état des connaissances concernant l'hydroponie et l'utilisation du thé de compost comme solution nutritive. La deuxième partie décrit la méthodologie de l'expérimentation concernant la production du thé de compost et son utilisation pour la culture de laitues sur un système bioponique low-tech. Les résultats d'expérimentation ainsi qu'une analyse de rentabilité de la production bioponique de laitues par rapport à la culture conventionnelle sur terre seront ensuite présentés et interprétés dans la troisième partie de l'ouvrage et feront l'objet de discussions afin d'en déduire des perspectives d'amélioration et une conclusion sur l'aboutissement de l'étude.

2. Contexte et problématique

Face à une population citadine toujours croissante de l'ordre de 3% par an, et l'urbanisation rapide de la capitale de Madagascar, l'agriculture dans la ville d'Antananarivo est confrontée à de nombreux problèmes surtout concernant le foncier, les problèmes de gestion de l'eau liés à la pollution urbaine, mettant ainsi en question sa durabilité (Aubry et al., 2014). L'agriculture en zone urbaine constitue encore un secteur informel à Antananarivo, elle est caractérisée par de petites exploitations et largement non régulée par les institutions concernées. Toutefois, l'agriculture urbaine constitue 90% de source d'approvisionnement des denrées consommées dans la capitale (Cirad,2019). Condamnée par l'expansion des infrastructures urbaines, l'agriculture dans la capitale persiste dans des conditions de pollution et d'éparpillement des déchets. La rareté du fumier a entraîné les agriculteurs urbains à exploiter directement les boues de vidange des fosses de toilette ou les criblés de la décharge municipale afin de compenser leur besoin en matière organique. Parallèlement, l'insuffisance d'appui technique sur le secteur agricole en ville a lourdement causé une défaillance du réseau d'irrigation, le laissant non fonctionnel, et empêchant la servitude d'eau d'irrigation sur les parcelles agricoles. Sans avoir reçu de formation, les agriculteurs utilisent directement les eaux usées domestiques non traitées qui sont disponibles à proximité dans les canaux d'assainissement et utilisent excessivement des pesticides (Défrise et al., 2019). Pourtant, l'utilisation des eaux usées non traitées combinée à l'utilisation excessive de pesticides et des fertilisants comme les boues de vidange ou criblés de décharges entraînent directement une mauvaise qualité sanitaire des laitues qui sont consommées crues. La consommation des laitues représente un risque sanitaire dans la capitale à cause de la contamination en métaux lourds des eaux usées et en agents pathogènes issus de la pollution fécale aiguë (Franz et al.,2008). Une réticence à la consommation de laitues s'accroît dans la capitale. Certains producteurs conscients de l'importance de la qualité sanitaire, produisent des laitues bio juste pour leur autoconsommation tandis que la partie vendue est produite de façon moins saine pour un maximum de profit (Dabat et al., 2012). Bien qu'une filière des légumes biologiques soit trouvée sur le marché, la quantité produite est faible et le prix est prohibitif pour la majorité des ménages malgaches dont les budgets et les conditions de vie se sont sérieusement dégradés ces dernières années. Une crise de production de légumes est aussi accentuée en saison pluvieuse due à la non maîtrise d'eau et la vétusté des canaux d'irrigation entraînant l'explosion des prix de légume (Dabat et al., 2012) .

Par ailleurs, des anciens projets se sont focalisés sur l'étude de l'évolution, la maintenance et accroissement de l'agriculture dans la ville d'Antananarivo. Parmi eux, le projet AULNA (Agriculture urbaine Low Space No Space) qui a promu des techniques d'autoproduction de maraîchage en micro-jardin dont quelques ménages ont pu bénéficier mais les produits ne sont pas encore suffisants pour être sur le marché et sont toujours affectés par les fléaux climatiques. D'autres projets d'AU appuient l'intensification de la production agricole pour l'approvisionnement des ménages urbains mais la qualité sanitaire des produits a été très peu évoquée (Aubry et al., 2020). Même s'il y a certains légumes qui

sont sains au niveau du marché, le doute se pose toujours vu qu'aucune distinction n'est faite sur le marché et la provenance est inconnue. Ainsi les consommateurs sans choix ou sont serrées par leur pouvoir d'achat sont victimes de la pollution. L'inaccessibilité à des produits de qualité bio sans pesticides, non pollués et à prix abordables entraîne une insécurité alimentaire dans la ville (Defrise, 2020).

L'adoption d'une nouvelle technique de production sans terre, comme l'hydroponie, qui esquive les contraintes climatiques et foncières, est primordiale afin d'assurer une production saine et durable de légumes en ville. L'hydroponie permet d'éviter la transmission de la pollution du sol à la culture, économise plus d'eau, limite l'utilisation des herbicides et réduit les traitements phytosanitaires. De plus, la solution hydroponique peut être formulée à partir d'engrais organique, et est dans ce cas qualifiée de bioponie (Tikasz et al., 2019). La promotion de la bioponie au niveau des maraîchers urbains à Antananarivo nécessite encore une étude comparative de rentabilité avec le mode de culture traditionnel en pleine terre afin de constituer un outil d'argumentation pour l'adoption de cette technique. Aussi, pour répondre aux besoins des agriculteurs, la technique bioponique proposée doit utiliser des intrants disponibles et accessibles sur place.

3. Objectifs de l'étude

L'objectif général est de contribuer à une production saine et durable de légumes dans la ville d'Antananarivo afin d'assurer la sécurité alimentaire. La présente étude consiste spécifiquement à :

- Développer un système hydroponique low-tech adapté aux maraîchers de la ville d'Antananarivo en utilisant les matériels facilement accessibles sur place.
- Formuler une solution nutritive avec des intrants organiques disponibles sur place
- Réaliser un essai agronomique de production de laitues avec une solution nutritive biologique en comparaison avec une solution à base d'engrais minéraux (comme témoin) sur un dispositif hydroponique low-tech
- Evaluer la rentabilité de la production bioponique de laitues et celle de la culture conventionnelle pratiquée par les agriculteurs à Antananarivo

Partie.1. Etat des connaissances

Ce chapitre présente un état de connaissance sur les concepts d'hydroponie, la nutrition minérale des plantes et la production de solution nutritive organique.

I.1. Hydroponie

Pour répondre aux exigences quotidiennes de la quantité et la qualité de production, la rareté foncière et les contraintes agro-climatiques, le secteur agricole n'a cessé d'évoluer et d'explorer des méthodes de culture plus productives. Selon Resh (1978), le progrès agricole est arrivé jusqu'à une technique de culture sans sol qui a été inspirée des anciennes pratiques de production existant depuis 1500 avant J.C . L'idée de culture hors-sol a été déjà pratiquée au cours de l'histoire dont les premières pratiques recensées sont les jardins suspendus de Babylone, les jardins flottants des Aztèques du Mexique.

Selon Beibel et al. (1960), le terme hydroponie est issu des mots hydro « eau » et du grec ponos signifiant « travail ». L'hydroponie est une méthode de culture sans sol, utilisant des substrats inertes pour soutenir les plantes dont les racines sont nourries par une solution nutritive Savvas (2003). Le premier système hydroponique commercial a été développé en 1930 par W F Gericke.

Il y a de nombreux avantages fournis par l'hydroponie:

- Production continue tout au long de l'année sur une courte période de croissance par rapport aux cultures sur sol, nécessitant moins d'espace et sans limite géographique lors d'une pratique sous serre ou dans un environnement de culture artificiellement maîtrisé (Hughes, 2017)
- Taille de récolte homogène, productivités et rendements plus élevés grâce à la méthode hautement contrôlée (Okemwa, 2015)
- Facilité de production, sans nécessité de labour et de désherbage (Nguyen et al., 2016)
- Réduction des consommations en eau et des produits phytosanitaires par rapport à la quantité utilisée en culture en terre, due à l'absence des pertes d'eau par infiltration et réduction de l'évaporation qui se produisent lors des cultures sur sol, aussi grâce à la recirculation de la solution nutritive dans les systèmes de culture hydroponique fermés (Gonnella, 2021)
- Réduction des déchets de récolte, à l'exemple des laitues qui sont les plus cultivées en hydroponie dans le monde, dont la bonne qualité de récolte atteint 99% et la valeur économique est 40% plus élevée que les laitues produites de façon traditionnelle grâce à la possibilité de production à proximité garantissant la fraîcheur des produits offerts sur le marché (Barbosa et al., 2015)

I.1.1. Différents systèmes de culture hydroponique

Les types de systèmes hydroponiques les plus populaires sont présentés ci-dessous. Le choix des systèmes pour un producteur repose sur la faisabilité aux facteurs suivants : disponibilité des matériaux, espace, objectif de productivité, milieu de culture et qualité du produit (Radhakrishnan G. et al., 2019).

Tableau1. Les principaux systèmes hydroponiques et leurs caractéristiques (Nguyen et al., 2016)

RAFT	Dans cette technique, les plantes sont semées sur le substrat dans des pots de culture et suspendues sur une plaque perforée flottant à la surface du bassin de culture. Les racines sont en permanence immergées dans une solution nutritive oxygénée par les pompes à eau ou pompe à air. Etant donné la grande quantité de volume d'eau nutritive utilisée, le RAFT est un système très avantageux pour réduire le risque de mortalité des plantes en cas de pannes de courant. Dans ce système, l'évaporation de la solution nutritive est réduite et il y a une bonne inertie de la température. Il offre également une facilité de récolte et de nettoyage.
Nutrient Film Technique (NFT)	C'est le système hydroponique le plus populaire. Le système NFT est un circuit fermé, utilisant un réservoir de solution nutritive, des canaux et une pompe. La solution nutritive est pompée en permanence à travers des canaux positionnés en pente dans lesquels sont placés les végétaux supportés par le substrat. Les canaux sont fermés avec des couvercles pour la rétention d'eau et pour empêcher la pénétration de la lumière dans la zone racinaire. La nomination NFT est liée au fait que les racines des plantes sont submergées dans une fine couche de solution nutritive. Le système NFT a comme avantage principale l'augmentation du nombre de plantes cultivées au m ² en exploitant l'espace en hauteur. Il ne nécessite qu'un faible volume de solution nutritive. Toutefois, il y a moins d'inertie thermique dans ce système ainsi qu'un grand risque de perte de récolte en cas de coupure d'électricité perturbant la circulation de la solution nutritive.
Table à marée ou Système de reflux (ebb and flow)	Ce système fonctionne sur le principe de l'inondation et de la vidange. Le système utilise un bac de culture contenant les plantes semées sur le substrat, un bac réservoir rempli de la solution nutritive et une pompe qui alimente périodiquement le bac de culture avec la solution nutritive qui ensuite s'écoule par gravité dans le réservoir après un laps de temps. Grâce à ce système, la nutrition et l'oxygénation des plantes sont identiques, permettant ainsi une homogénéité des récoltes.
Goutte à goutte (DRIP SYSTEM)	Dans ce système, la solution nutritive est mise à part dans un réservoir, et les plantes sont cultivées séparément dans un autre conteneur. A l'aide d'une pompe et des goutteurs, la solution nutritive du réservoir goutte en permanence à chaque plante individuelle dans une proportion appropriée.

Les systèmes hydroponiques sont généralement installés sous une toiture ou une serre. Des auteurs (Hatfield et al. 2011 ; Hatfield et Prueger 2015) ayant testé la culture hydroponique de laitues en zone tropicale stipulent qu'il y a un inconvénient de température élevée dans la zone racinaire des plantes. Par conséquent, il est primordial de bien choisir le type de système utilisé en fonction du milieu environnemental. Le radeau flottant hydroponique semble fournir une homogénéité de température et un refroidissement plus favorables aux racines des plantes selon l'expérience de Niam (2017).

I.1.2. Les différents substrats utilisés en hydroponie

L'hydroponie utilise une substance inerte chimiquement qui remplace la terre appelée substrat, et qui est utilisée comme support de culture pour les plantes. Il a aussi pour fonction de protéger les racines de la lumière et leur permettre de respirer ainsi que véhiculer la solution nutritive. Il existe plusieurs variantes de substrats selon leur origine (Alain, 2003) :

- Origine minérale :
 - Naturels (extraits): graviers, sables, pouzzolane.
 - Manufacturés: laine de roche, laine de verre, argile expansée, vermiculite, perlite.
- Origine organique :
 - Naturels: tourbe, terreau, cèdre rouge, écorces de pin, fibres de coco.
- Origine synthétique: matériaux plastiques expansés, billes de polystyrène, mousse de polyuréthane, grains d'eaux (polycrylamides)



De gauche à droite et de haut en bas : laine de roche, mousse polyuréthane, schiste expansé, roche volcanique, granulés d'argile, argile expansée, perlite, tourbe noire, fibres de bois grossières, fines fibre de bois, vermiculite et tourbe légère

Figure.1. Les principaux substrats utilisés en culture hydroponique (Gruda et al. 2006 cité dans FAO, 2013)

I.1.3. Nutrition des plantes en hydroponie

Les plantes cultivées en hydroponie ont la même caractéristique physiologique que les plantes cultivées sur sol. Pour se nourrir, les plantes ont besoin des minéraux dont 16 éléments sont définis essentiels à leur croissance. Les éléments: carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre, potassium, magnésium et calcium sont utilisés en grandes quantités par la plante et sont définis comme macroéléments. Parmi ces macroéléments, l'azote, le phosphore ainsi que le potassium sont considérés comme éléments primaires dont les plantes ont régulièrement besoin en abondance, et le reste sont qualifiés éléments secondaires. Les minéraux puisés en quantité trace par les plantes sont constitués de fer, chlore, manganèse, bore, zinc, cuivre et molybdène. Ils sont classés comme micronutriments (Resh, 1978).

La nutrition des plantes peut se faire par un apport d'engrais minéral et engrais organique. Contrairement aux engrais minéraux obtenus à partir des extractions minières et des synthèses chimiques, l'engrais organique est fait exclusivement des matières naturelles animales ou végétales. Il va devoir subir une décomposition par des microorganismes pour être assimilable par les plantes. Ce phénomène, connu sous le terme de minéralisation, aboutit à la libération des ions minéraux par désagrégation et dépolymérisation successives des molécules organiques. Ces ions minéraux contribuent aux sels solubles et augmentent la valeur de la conductivité électrique du substrat (Fisher et al., 2016).

La minéralisation dépend des matières premières composant de la matière organique et de l'activité microbienne. En effet, les microorganismes ont besoin de conditions propices pour se développer dont la présence d'air en quantité suffisante, une température assez élevée et un niveau d'acidité adéquat. Ils ont aussi besoin des nutriments majeurs comme le carbone (C) et l'azote (N) de la matière organique pour puiser de l'énergie. En utilisant le C et le N, ils décomposent la matière organique et libèrent les autres nutriments liés aux carbones qu'elle contient. Ceux-ci deviennent ainsi disponibles pour les plantes qui absorbent les éléments minéraux que sous forme d'ions (Scheiner, 2005). Le rapport C/N est l'un des indicateurs de vitesse de minéralisation de la matière organique. Plus le rapport C/N est élevé (>12), plus l'activité biologique est réduite et la minéralisation est lente (Sullivan et al. 2018).

I.1.3.1. L'azote

L'azote est l'élément indispensable à la croissance et au développement de toutes les plantes cultivées. Il intervient dans la fabrication de la chlorophylle, et joue un rôle vital dans la photosynthèse. L'azote entre également dans la composition des acides aminés, des protéines et des enzymes. (Tremblay et al., 2004).

L'azote peut se présenter sous plusieurs formes selon son cycle biogéochimique. L'azote organique contenue dans les amendements organiques (fumier, compost, sous-produits agricoles), nécessite encore une phase de minéralisation pour être assimilable par la plante. Basée sur la revue de l'ouvrage de

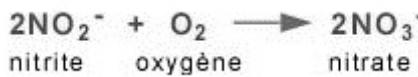
Bernhard A. (2010), l'objectif est de faire une synthèse des aspects importants du cycle d'azote et ses facteurs d'influence, pouvant être observés lors de la minéralisation de la matière organique, afin de comprendre les hypothèses et les résultats présentés dans les chapitres suivants.

Les phases de transformation de l'azote les plus importantes pour la nutrition des plantes sont l'ammonification et la nitrification (Scheiner, 2005). Toutefois, la phase de perte d'azote en atmosphère constituée par les processus de la dénitrification et l'anammox peuvent aussi subvenir. Ces processus influencent la disponibilité de l'azote assimilable par la plante. Toutes ces transformations sont issues des activités des microorganismes qui résultent à des réactions d'oxydo-réduction sur l'azote (Bernhard A., 2010).

L'ammonification est le processus de transformation de l'azote organique qui permet d'obtenir de l'ammoniac NH_3 ou l'ammonium NH_4^+ disponible pour les plantes. L'ammoniac est la première forme d'azote libérée lorsque les protéines de la matière organique se décomposent. Ce processus de minéralisation utilise l'acide (H^+) et libère des hydroxydes libres (OH^-) dans le substrat faisant augmenter le pH. La température et le pH influencent positivement le rapport du NH_3 au NH_4^+ produit. À un pH inférieur ou égal à 7, la plupart de l'ammoniac (>95 %) sera sous forme NH_4^+ . Le NH_3 à un pH donné, augmentera avec l'augmentation de la chaleur de l'eau. Sous une température de 27°C, le pourcentage d'ammoniac sous forme toxique (NH_3) est de 2 % à pH 7,5 et de 18 % à pH 8,5.

La nitrification est la phase qui transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , NH_3) en nitrites et nitrates (soient NO_2^- et NO_3^-), sous l'effet des bactéries genre nitrobacter et nitrosomas en présence d'oxygène obligatoire. Lorsque l'ammonium ainsi que les bactéries nécessaires à sa décomposition sont présents dans le substrat, la nitrification commence. Il y a libération des cations H^+ quand les microorganismes dégradent l'azote ammoniacal. Ainsi, le processus de nitrification réduit le pH.

La nitrification est sensible au pH. Elle est optimale pour des valeurs de pH comprises entre 6,6 et 8. La réaction consomme de l'alcalinité. En dehors de ces valeurs, la nitrification est considérée comme négligeable (Grady et al. 1980). Une étude réalisée par Tyson et al. (2007), a montré qu'à un pH 8,5, le taux d'oxydation d'ammonium augmente beaucoup plus vite par rapport à la nitrification, résultant à une grande accumulation de nitrite non favorable à la plante (valeur élevée de 4,2 mg L⁻¹ NO_2^-).

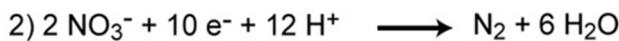


Source : Bernhard A. (2010)

D'après Cáceres et al.,(2015), l'absorption du nitrate ou de l'ammonium par la plante a des conséquences sur le pH du substrat. Une absorption en nitrate alcalinise le milieu tandis que celle en ammonium

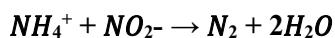
acidifie. La plante libère des ions H⁺ quand elle absorbe l'azote ammoniacal (NH₄⁺) car celui-ci est converti en ammoniac (NH₃) par les racines. L'absorption de l'azote sous forme nitrate fonctionne différemment. La plante libère des anions OH⁻ ou HCO₃⁻ lors de l'absorption des nitrates par les racines. Ces anions chargés négativement sont des bases et provoquent une élévation du pH. Par ailleurs, pour le maintien de la neutralité électrique dans la plante, chaque charge positive absorbée (K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, NH₄⁺) est compensée par la libération d'un H⁺ qui acidifie. Inversement, chaque charge négative absorbée (NO₃⁻, SO₄²⁻, H₂PO₄⁻ ou HPO₄²⁻) est compensée par l'absorption d'un H⁺, ce qui basifie le substrat (Marschner, 1995).

Le retour d'azote en atmosphère peut se faire par deux types de processus anaérobique. Le premier correspondant à la **dénitrification** qui reconvertis le nitrate à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N₂ quand les microorganismes dénitritifiants entrent en compétition avec les cultures pour l'utilisation des nitrates. La dénitrification est un processus qui se produit en anaérobiose, sous une concentration suffisante en NO₃⁻ ainsi qu'une source de carbone facilement disponible puisque le processus implique des bactéries hétérotrophes.



Source : Bernhard A. (2010)

Le deuxième processus appelé anammox consiste à l'oxydation de l'ammonium par des bactéries anaérobiques utilisant les nitrites pour la conversion en diazote atmosphérique.



Source : Bernhard A. (2010)

Parallèlement à ces trois phases du cycle d'azote, des pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac peuvent aussi survenir selon les conditions de pH du milieu et la condition climatique (Sommer et al., 1991).

Une partie de l'azote inorganique est aussi fixée par d'autres organismes (plantes, microorganismes) qui les utilisent pour leurs développements (Banas D et Lata JC, 2009).

C'est sous forme de nitrate (NO₃⁻) que l'azote est principalement absorbé par les plantes et des faibles quantités sous la forme NH₄⁺ (Tremblay et al., 2004). Une étude de Nelson (2011), montre que la concentration de l'ammonium favorable en culture hydroponique ne dépasse pas 40% de la teneur en azote total. Au-dessus de ce seuil, la concentration élevée en ammonium favorise son absorption par la plante. Non converti en nitrate, l'ammonium s'accumule dans la plante et endommage les cellules végétales (Mattson et al., 2013).

En effet, les plantes n'ont pas la capacité d'exclure l'ammonium par le système d'influx plasma-membrane et, par conséquent, accumulent des quantités excessives dans le cytosol (Goyal et Huffaker ,1984).

Une revue de Mérigout (2006) explique que l'ammonium interagit avec les systèmes d'absorption du nitrate. A faible concentration, l'ammonium a un effet inducteur rapide. Par contre, à concentration plus élevée, l'ammonium inhibe rapidement et réversiblement l'absorption du nitrate.

Le diazote (N_2) et l'ammoniac (NH_3) sont non assimilables et toxiques pour les plantes. L'ammoniac (NH_3) est toxique pour les plantes à des niveaux supérieurs à 2 mg/l (Fisher et al., 2016). Le nitrite n'est pas aussi favorable pour la plante car il contribue au développement d'une toxicité en ammonium (Mattson et al. , 2013). Une concentration en nitrite au-dessus de 4,2mg/l est déjà toxique pour la plante car elle limite l'absorption en oxygène selon Tyson et al (2007). Le brunissement des feuilles est le symptôme de toxicité en nitrite sur la laitue (Hoque et al., 2007).

Les signes de carence en azote apparaissent en premier sur les vieilles feuilles. En effet, la plante utilise l'azote disponible pour la formation des nouvelles feuilles, au détriment de ses feuilles plus vieilles et moins productives. Les feuilles âgées ont une teinte vert pâle ou jaune lors d'une carence en azote. Par contre, les symptômes de toxicité en ammonium apparaissent sur les nouvelles feuilles sous forme de chlorose accompagnée de taches nécrotiques (Mattson et al. , 2013).

I.1.3.2. Le phosphore

Le phosphore est présent chez tous les organismes vivants. Chez les végétaux, il constitue un composant majeur et un élément minéral essentiel. Il est absorbé par la plante sous la forme d'ions phosphates $H_2PO_4^-$ et $H_2PO_4^{2-}$. Dans le sol, le phosphore s'obtient par une dégradation progressive des roches mères (Lachapelle, 2010). Le phosphore a un rôle lié au stockage et transfert d'énergie (ATP), à la formation de composés structurels (nucléotides, acides nucléiques, coenzymes, phospholipides, etc...) intervenant dans le développement racinaire, la formation des grains, fruits et fibres, la maturation des fruits et le pouvoir germinatif des semences (Resh, 1978) .

Grâce à l'action des microorganismes, la minéralisation de la matière organique animale et végétale libère aussi des phosphates contenus dans les molécules organiques. Il existe trois formes organiques de phosphore (Fardeau et al., 1994) :

- Phosphates d'inositol (10 à 60% du phosphore organique) : L'acide phytique n'est pas digestible par les animaux et peut donc se retrouver dans des quantités élevées dans les excréments des animaux nourris aux graines tels que les volailles.
- Phospholipides (1 à 5% du phosphore organique) : qui sont des composants clés des membranes cellulaires microbiennes.
- Acides nucléiques (0,2 à 0,5% du phosphore organique) : les plus connus sont l'ADN et l'ARN.

Le phosphore a une forte interaction avec le calcium, le fer, le manganèse et l'aluminium en fonction de l'acidité du milieu. En fixant avec ces ions, il devient non assimilable par les plantes (Figure.2). Au-delà du pH 6,5, le phosphore commence à être indisponible pour les plantes hydroponiques (Graeme A. et al., 2019).

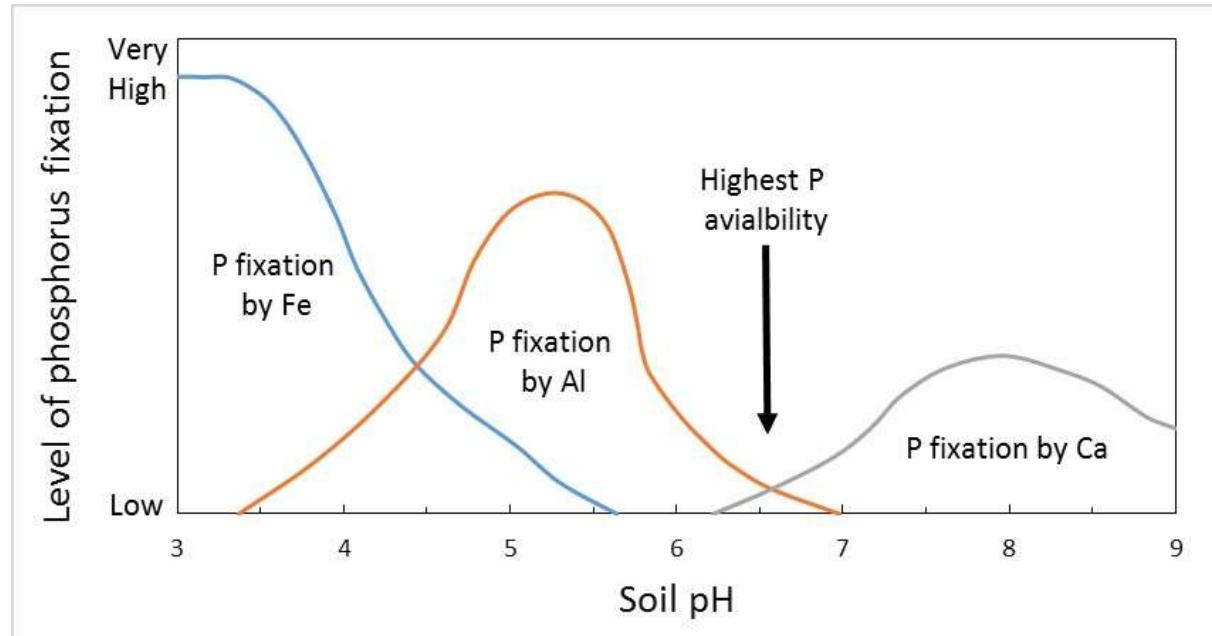


Figure.2. Relation entre la biodisponibilité du phosphore et le pH du sol (Graeme A. et al., 2019)

Leikam et al.(1983) explique la relation existante entre l'absorption du phosphore et l'azote ammoniacal. L'azote ammoniacal induit l'absorption du phosphore par la plante. Le phénomène s'expliquerait par l'acidification du pH lors de l'absorption de l'ammonium, ce qui favorise la solubilité de certains sels de phosphore. Réciproquement, pour que les plantes utilisent le supplément d'azote (lors de la synthèse des protéines ou de la chlorophylle), elles ont besoin de phosphore pour fournir l'ATP nécessaire.

La carence en phosphore s'observe généralement par un retard de floraison et une couleur violacée des feuilles.

I.1.3.3. Le potassium

Dans le sol, 90 à 98% du potassium sont sous forme cristalline insoluble et trouvée dans les roches telles que les feldspats et mica. L'érosion de la roche permet leur libération pour être disponible pour les plantes. Une fois absorbé par la plante, le potassium est libéré après la décomposition des résidus végétaux par les microorganismes. Comme le potassium n'est pas directement lié dans les molécules organiques, il ne subit pas de minéralisation spécifique. La décomposition des tissus organiques par les microorganismes rend ce potassium accessible par les plantes (Prajapati K et Modi et H.A. 2012).

La plante absorbe le potassium sous la forme K^+ . Le potassium a un rôle important dans la synthèse des sucres et des protéines ainsi que leur migration dans le fruit. L'absorption du potassium se couple avec celle du nitrate (Blevins et al. 1978). Il facilite l'absorption de l'azote et du phosphore et augmente la résistance des plantes. Les symptômes de carence en potassium apparaissent dans les feuilles les plus âgées sous forme de nécrose (FAO, 2013).

I.1.4. Gestion de la solution nutritive

Une revue écrite par Kumar et al. (2021) explique l'importance de la gestion des nutriments en hydroponie. En culture hydroponique, les éléments nutritifs des plantes sont dissous dans l'eau et sont généralement inorganiques. En raison de l'absence du sol qui a la capacité à tamponner les nutriments, les cultures hydroponiques nécessitent une surveillance régulière et ajustement de la qualité de la solution nutritive. Elle nécessite également un suivi régulier de la réponse des plantes aux nutriments. Pour cela, l'hydroponie est une technique qui se pratique sous un environnement contrôlé, fréquemment sous serre car il est primordial de faire un contrôle régulier du pH et la conductivité électrique de la solution nutritive afin de fournir aux plantes leurs besoins adéquats à chacun des stades de leur vie.

I.1.4.1. Niveau de pH en hydroponie

Le pH mesure l'acidité ou l'alcalinité sur une échelle de 1 à 14. Le pH de la solution nutritive a un impact majeur sur la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Hussain et al., 2014).

La figure.3 présente la gamme de pH optimum pour la majorité des cultures hydroponiques. Cela varie entre 5,5 à 6,5 mais plusieurs plantes peuvent aussi se développer en dehors de cette gamme (Bugbee B., 2003). En dehors du plage de pH recommandé pour une culture hydroponique, des symptômes de carence ou toxicité en éléments nutritifs seront développés sur la plante (Hussain et al., 2014).

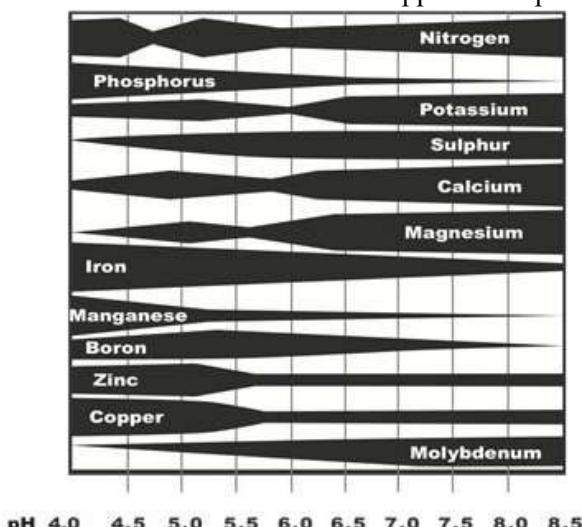


Figure.3. Diagramme d'assimilation des minéraux en fonction du pH (Bugbee B., 2003 in manicbotanix)

I.1.4.2. Valeur de l'électro conductivité

L'électro conductivité (EC) indique la concentration totale de la solution nutritive en nutriments sous forme ionique. La valeur de l'EC est proportionnelle à la saturation en ions de la solution nutritive (Lennard, 2012). Toutefois, selon Carmassi et al.(2003), l'EC ne représente pas tous les éléments nutritifs, seulement la Calcium, Magnésium, Potassium, Sodium et d'autres mais pas l'azote et le Phosphore.

$$EC = 0 + 0.78 (Na) + 0.28 (K) + 0.04 (Mg) + 0.06 (Ca)$$

Une EC plus élevée que la plage optimale, empêchera l'absorption des nutriments due à la pression osmotique et si elle est inférieure qu'une plage optimale, cela entraînera aussi une carence pour la plante (Hussain et al., 2014).

Le tableau suivant montre la gamme appropriée de valeurs EC et pH pour plusieurs cultures hydroponiques.

Tableau2. Valeurs de pH et EC pour certaines cultures hydroponiques (Sardare et al., 2013)

Crops	EC (dSm^{-1})	pH
Asparagus	1.4 to 1.8	6.0 to 6.8
Tomato	2.0 to 4.0	6.0 to 6.5
African violet	1.2 to 1.5	6.0 to 7.0
Basil	1.0 to 1.6	5.5 to 6.0
Banana	1.8 to 2.2	5.5 to 6.5
Broccoli	2.8 to 3.5	6.0 to 6.8
Cabbage	2.5 to 3.0	6.5 to 7.0
Cucumber	1.7 to 2.0	5.0 to 5.5
Egg plant	2.5 to 3.5	6.0
Lettuce	1.2 to 1.8	6.0 to 7.0
Peppers	0.8 to 1.8	5.5 to 6.0
Spinach	1.8 to 2.2	6.0 to 7.0

Au fur et à mesure de leur développement, les plantes modifient la conductivité électrique (EC) et le pH quand elles absorbent les nutriments et l'eau de la solution nutritive. La fréquence et le volume de la solution nutritive à appliquer pour une culture hydroponique varient selon le type de substrat utilisé, le type de culture, les dimensions du conteneur, le système d'irrigation et les conditions climatiques (Singh et Singh, 2012).

I.1.4.3. Température et oxygénation de l'eau

La température et la saturation en oxygène ont une corrélation négative. Plus l'eau est chaude, plus sa rétention en oxygène est réduite. De plus, une température élevée peut limiter l'absorption des nutriments essentiels. A forte température, la plante doit augmenter son taux de transpiration pour se rafraîchir et dans ce sens elle consomme plus d'eau que d'ions. Une température élevée peut accélérer la floraison précoce et le potentiel d'agents pathogènes des racines des plantes. La température optimale de la solution nutritive se situe entre 10 et 25 °C (Jensen M.H. et al, 1973).

L'oxygène est un paramètre primordial pour que les racines absorbent efficacement les nutriments. Les racines ont besoin de 7 à 10 ppm de teneur en oxygène dissous en hydroponie. Plus il y a une bonne quantité d'oxygène dissous dans l'eau, plus la plante va grandir si vite et elle sera vigoureuse (Zheng et al., 2007). L'oxygénation de l'eau est aussi importante pour empêcher le développement des microorganismes indésirables. Dans le cas d'utilisation d'une solution organique en hydroponie, l'oxygénation est un paramètre important pour favoriser la minéralisation des molécules organiques afin que ceux-ci soient disponibles pour les plantes. Il est aussi essentiel pour soutenir le développement d'une communauté de bactéries aérobies bénéfiques dans la zone racinaire (Sarlé , 2020).

I.2. Bioponie

Malgré les nombreux avantages du système hydroponique, l'utilisation accrue des engrains minéraux dans ce système entraîne des impacts sur l'environnement et sur le plan économique. En effet, les engrains minéraux sont produits par synthèse chimique, ou par exploitation de gisements naturels comme le cas du phosphate et du potassium. La production des engrais minéraux fait disparaître les ressources minières, modifie le paysage naturel. En plus, leurs procédés de transformation sont très énergivores et polluants (Dumitrescu, 2013).

Ajouté à cela, l'accessibilité et la disponibilité des engrais minéraux sont encore limités pour certains pays en voie de développement. L'importation de ces produits cause des impacts négatifs sur le plan financier et environnemental reliés au transport (Basosi et al., 2014).

La technique de culture bioponique a été développée pour pallier le problème d'utilisation d'engrais minéraux dans l'hydroponie conventionnelle. En effet, la bioponie est la pratique dérivée de l'hydroponie, caractérisée par l'utilisation des engrais d'origine organique pour la composition de la solution nutritive. La bioponie n'est rien d'autre que l'hydroponie biologique (Shubha, 2019).

En bioponie, les solutions nutritives utilisées ne sont pas directement assimilables par les plantes, nécessitant une vie microbienne pour la minéralisation (Tikasz., 2019).

La littérature montre qu'il existe déjà diverses études expérimentales sur la production de solution nutritive biologique. Toutefois, ces modes de production et les résultats obtenus sont très diversifiés, non seulement par la variabilité des procédés techniques mais aussi par les intrants organiques utilisés.

Les matières organiques peuvent être des déjections animales, de compost des déchets ménagers et agro-industriels, de vermicompost, des résidus agricoles (Calvet et al., 2015).

Ces matières organiques subissent encore un procédé de transformation pour leur décomposition et minéralisation avant d'être utilisées comme solution nutritive bioponique. Divers modes de production des solutions nutritives biologiques ont été déjà exploités tels que l'infusion en thé, la digestion bactérienne aérobique et anaérobique aussi bien qu'une combinaison de ces méthodes. La qualité des solutions biologiques est très variable en fonction du procédé de transformation effectué.

De part la variabilité des résultats de production de la solution nutritive organique, plusieurs recettes de solution nutritive sont encore à explorer dans le domaine de la bioponie.

La présente étude se focalise sur l'utilisation du compost de déchets municipaux et de fientes de poules pour la production de solution nutritive organique. Les déjections animales sont citées comme les plus riches en N, P et K directement disponibles pour les plantes (Shaji et al., 2021). Toutefois, la teneur en nutriment des déjections animales varie selon les caractéristiques du cheptel dont elles proviennent notamment en termes de régime alimentaire de l'animal, sa physiologie et les conditions de stockage (Green, 2015).

Le compost des déchets municipaux peut avoir une teneur élevée en nutriments directement assimilables par les plantes. Cependant, cela dépend de la qualité de compostage et des types de déchets utilisés (Gimenez et al., 2020). Environ 5% de l'azote total est disponible, si le compost a un ratio C/N entre 10 et 20 (Sullivan et al. 2018).

I.3. Principe de production du thé

Le thé de compost est défini comme un extrait aqueux de compost infusé (Ingham E. 2005). Le principe de production de « thé » consiste à faire une macération ou infusion de l'engrais organique comme le compost ou les déjections animales dans de l'eau oxygénée, sans utilisation de chaleur, afin d'extraire une solution concentrée (Arancon, 2012). Après son extraction, le thé obtenu est colonisé par les microorganismes utiles présents dans la matière initiale grâce à l'oxygenation apportée lors de l'infusion. Mis à part sa richesse en nutriments, ce thé possède aussi toutes les vertus issues du compost lors de son application sur le sol notamment des effets de protection des plantes contre certains bio-agresseurs (Ingham E., 2005).

Dans leur étude, Radin et Warman (2011) obtiennent un thé de compost en mettant 2kg de compost (poids frais) dans un sac en étamine noué et qu'ils ont suspendu dans un seau de 10 L d'eau de pluie froide. Le sac a été agité pendant quelques minutes, deux fois par jour, pour s'assurer que l'eau pénètre adéquatement au milieu de la masse de compost. La durée d'infusion est de 72h, puis ils ont retiré le sac et l'ont laissé s'égoutter sur le seau pendant un jour supplémentaire.

Des essais menés par Tikasz et al. (2019) ont montré qu'un thé à base de fumier de dinde utilisé sur une culture de laitues hydroponiques (ebb and flow) a produit une quantité de biomasse sèche plus élevée que la solution hydroponique conventionnelle (Hoagland solution). La laitue cultivée dans une solution de thé de fumier de dinde (50 g/L) a obtenu la plus grande moyenne de masse humide aérienne $19,1 \pm 2,7$ g contre $17,5 \pm 0,7$ g pour celle cultivée dans la solution hydroponique conventionnelle même si l'EC du thé de dinde est plus faible (0,6 mS) que celle de la solution hydroponique conventionnelle (2 mS). Le thé de fumier de dinde a été obtenu en macérant une concentration de 50 g/L de fiente de dinde pendant deux jours. Les concentrations de N- NO_3^- et N- NH_4^+ dans ce thé à base de fumier de dinde sont respectivement de 11,7 mg/L et 35 mg/l. Durant ses essais, Tikasz et al. (2019) ont aussi testé le thé à base de fumier de poule et de vache à différentes concentrations (10, 25, et 50 g/L). Les résultats d'analyses des éléments nutritifs de tous les thés à base de fumier ont montré une concentration de N- NH_4 de 29 à 79 % plus élevée et une teneur en azote total plus élevée que la solution hydroponique conventionnelle. L'auteur a également signalé une perte de la récolte due à une toxicité en ammonium dans le thé à base de fumier de poule de concentration 25 et 50g/l étant donné que la concentration de NH_4 augmente parallèlement avec la concentration en fumier de poule utilisée. Leur étude démontre aussi que la concentration en ammonium varie selon le type de fumier utilisé. Elle reste faible et stable à environ 16 mg/L pour toutes les différentes concentrations de thés à base de fumier de vache testées (10, 25, et 50 g/L), et une grande variation de concentration en NH_4 a été enregistré dans le thé à base de fiente de dinde (culminant à $164,2 \pm 14,8$ mg/L dans la solution à 25 g/L et 35 mg/l dans la solution 50g/l). Leur expérimentation a aussi montré une variation de pH entre une plage de 7 et 8 pour les thés. Leudtke (2010) a fait une étude comparative entre un thé de compost de dosage 200 g/L, oxygéné et infusé pendant 48 heures, et une solution inorganique (Plant Prod 2001) de composition en NPK 18-9-27 et de concentration 0,55 g/L, sur une culture hydroponique à système circuit fermé. Au cours de l'expérimentation, la solution nutritive thé de compost a été remplacée toutes les deux semaines par une nouvelle solution. L'auteur a remarqué des fluctuations de pH tout au long de l'essai avec un minimum de 7,6 et un maximum de 8,3 dans le thé de compost. Toutefois, les plantes cultivées dans le thé de compost ont terminé leur cycle de vie et semblaient visuellement être en meilleure santé, bien que plus petites que celles du traitement témoin.

D'une manière générale, il est vu dans la littérature des contraintes majeures à l'utilisation du thé de compost et fumier telles que la toxicité des plantes due à la forte concentration de NH_4^+ dans le thé, dépassant la concentration maximale recommandée en culture hydroponique. Pour cela, favoriser la nitrification de l'ammonium en nitrate (NO_3^-) est primordial pour obtenir un ratio ammonium : nitrate optimum adapté à la culture (Takemura et al., 2016). Il a été aussi mentionné que la dynamique du pH est plus complexe dans la bioponie et son contrôle est très important. En effet, l'absorption des nitrates par les plantes augmente le niveau de pH alors que la réaction de nitrification le diminue (Botheju et al. , 2010). Le pH peut sans problème monter à 7,5 en bioponie (Texier, 2013).

Contrairement à l'hydroponie conventionnelle, il y a une minéralisation de la matière organique dans la solution nutritive bioponique, pour libérer des nutriments assimilables par la plante. Une vie microbienne assure les processus de minéralisation dont les plus importants sont les réactions d'oxydo-réduction sur l'azote organique (ammonification, nitrification et dénitrification) et la dégradation de la matière organique libérant le phosphore et le potassium. Un biofiltre est placé dans le réservoir pour favoriser le développement de la vie microbienne dans la solution organique. Le biofiltre est un support fait de substrat inerte, servant de niche aux micro-organismes qui vont minéraliser la matière organique, et à partir duquel ils pourront coloniser les plantes et le système de culture. La bioponie tolère une EC plus basse (0,6 mS) qu'en hydroponie conventionnelle car au fur et à mesure que des éléments sont libérés par les microorganismes, d'autres sont absorbés (Texier, 2013).

La littérature nous renseigne aussi que la composition du thé de compost est très variable selon la source et les caractéristiques du compost, la cuve de fermentation, l'eau utilisée, la teneur en oxygène et la durée d'infusion ainsi que les méthodes de filtration. Le thé de compost est généralement moins riche que la solution nutritive de l'hydroponie conventionnelle (Scheuerell et Mahaffee, 2002).

Les tableaux .3 et.4 ci-dessous renseignent la qualité nutritive de différents thés essayés en bioponie et la composition en éléments minéraux d'une solution nutritive conventionnelle préparée à partir de minéraux synthétisés utilisés en culture de laitues hydroponiques.

Tableau3. Qualité nutritive de différents thés

Source de matière organique pour le thé	Durée d'infusion	Concentration	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	P	K	Ca	Mg	EC	pH	Références
			mg/l							mS/cm		
Fumier de poule	2 jours	50g/L	0,6	284,6				44	20,6	0,5 à 1,6	7,8 à 8,2	Tikasz et al., 2019
Fumier de vache			3,5	11,9				62,4	45,4			
Fumier de dinde			11,7	35,2				23,2	29,1			
Compost de déchets municipaux	2 jours	200g/l	6,3			6,2	82,55	39,2	20,1		7,6 à 8,3	Leudtke, 2010
Compost de déchets municipaux						0,6	109	85,4	19,8		7,8	Radin A. M. et Warman P. R, 2010

Tableau4. Composition d'une solution nutritive conventionnelle (mg/l) pour une culture de laitues hydroponiques (Cometti et al., 2013)

	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	K	P
mg/l	12,3	105,6	184	29

Partie.2. Hypothèse de recherche et les points focus du travail

En référence aux études trouvées dans la littérature, notre première hypothèse se base sur la faisabilité de production d'une solution nutritive hydroponique avec du thé de compost et/ou mélangé aux fientes de poule. La deuxième hypothèse attendue est la potentielle rentabilité économique de la technique de culture bioponique de laitues pour substituer la technique de culture en terre dans la ville d'Antananarivo.

Le présent travail comporte donc trois axes d'études :

- Une expérimentation pour la production de thés de compost et/ou fientes de poules
- Deux essais agronomiques de production de laitues sur un dispositif hydroponique utilisant les thés comparés à la solution nutritive chimique conventionnelle
- Analyse de rentabilité du système hydroponique par rapport à la culture conventionnelle de laitues pratiquée à Antananarivo

Partie.3. Matériels et méthodes

III.1. Le site expérimental pour la culture hydroponique

L'essai de culture hydroponique a été réalisé dans une zone extérieure ouverte avec une toiture pour profiter de la lumière du jour. La région d'étude est caractérisée par un climat tropical d'altitude. Les expérimentations ont été réalisées pendant la saison hivernale de mai à août 2022. Les températures moyennes étaient comprises entre 14° C à 23° C et l'humidité relative entre 74 % à 63%. (Climate-Data.org, 2022). Toutes les expérimentations ont été réalisées à température ambiante, sous ombrage.

III.2. Essai de production de solution nutritive

Pour cette étude, trois types de solution nutritive ont été préparées (Figure.4) :

- SA : solution nutritive à base d'engrais soluble
- SB : solution nutritive à base de thé de compost « KOMPOSTECO »
- SC : solution nutritive à base de thé de compost « KOMPOSTECO » + Fientes de poules



Figure.4. Différents types de solution nutritive testés

III.2.1. Préparation de la solution nutritive SA à base d'engrais soluble

La solution nutritive témoin est préparée à base d'engrais soluble nommé DEMARRAGE disponible à Madagascar (Figure.5). C'est un engrais utilisé au sol, mais à cause de l'indisponibilité d'une solution hydroponique sur le marché local, il a été testé dans notre étude. Cet engrais contient : N: 28%, P₂O₅: 10%, K₂O: 10%, S: 2%, MgO : 3%.

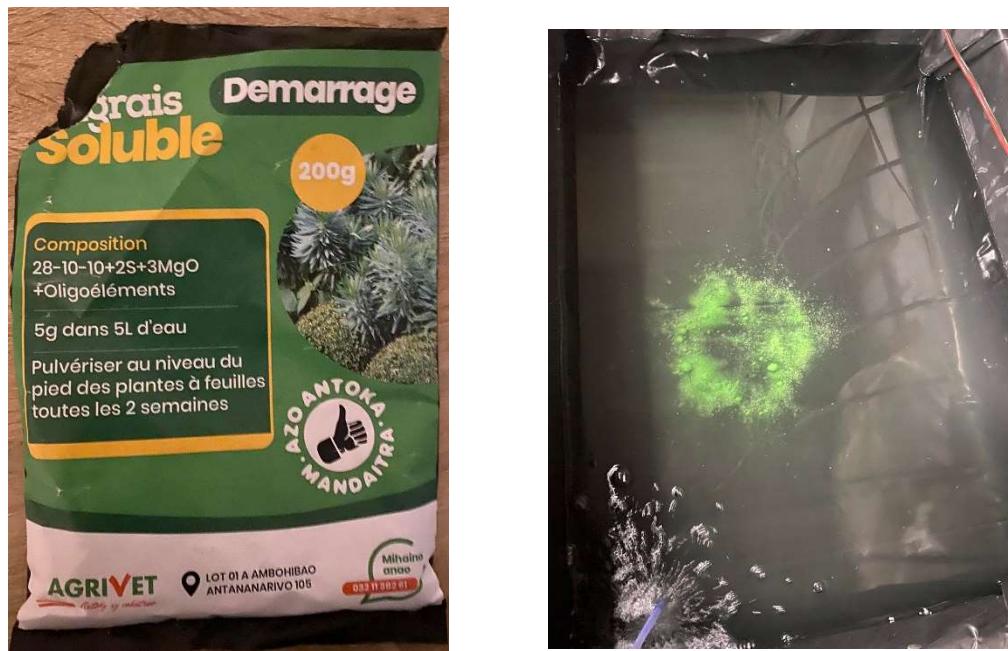


Figure.5. Préparation de la solution nutritive chimique SA

La quantité utilisée pour la préparation de la solution nutritive SA est de 1 g / litre et 4 g/litre.

Le tableau suivant présente la concentration en NPK des différents dosages utilisés.

Tableau5. Concentration en minéraux de la solution nutritive SA préparée

	(mg/l)		
	N total	P	K
Composition en nutriment :	28%	10%	10%
Dosage de dilution :	1 g/l	280	100
	4 g/l	1120	400

III.2.2. Préparation des solutions nutritives SB et SC à base de thé de compost oxygéné

Deux types de thé compost ont été préparés :

- SB : thé à base de Komposteco uniquement
- SC : thé avec un mix entre 75 % Komposteco + 25% Fientes de poules (valeur en pourcentage massique de la masse fraîche)

Le Komposteco est un compost produit par l'entreprise MADACOMPOST à partir des déchets organiques municipaux (déchets de jardin résidentiel, déchets alimentaires en combinaison avec des déchets de papier et de carton). Le compost est mature après 3 mois de mise en andain avec un retournement manuel. Une analyse physico-chimique du KOMPOSTECO réalisée en 2021 par le laboratoire de LRI Antananarivo indique les résultats suivant : 1,08 % d'azote total, 0,3% de phosphore, 0,7% de potassium, 12,4% de carbone organique et 11,7 de C/N. Une partie de ce compost a été stockée en milieu sec, et est utilisée pour cette étude.

Les fientes de poules proviennent de petites fermes urbaines qui produisent des poulets de chair. Les fientes sont composées des excréments et des sciures de bois utilisées comme litière.

III.2.2.1. Détermination de la matière sèche

Avant la préparation du thé de compost, le pourcentage en matière sèche du KOMPOSTECO et fientes de poules a été évalué. Sans étuve à disposition, 1kg d'échantillon de Komposteco et fientes de poules ont été séchés au soleil (durée 6h) puis mis au four à 40°C (durée 2h), pendant 7 jours. La masse de chaque échantillon a été évaluée tous les jours. Le séchage est terminé quand après trois jours de mesures successives, la masse de chaque matière n'a plus diminué.

A la fin du séchage, la masse finale du kompesteco est 790g et celle de la fiente 600g, correspondant respectivement à 79% et 60 % de teneur en matière sèche.

III.2.2.2. Mode de préparation de l'infusion du thé de compost

Avant l'infusion, un tamis du compost et des fientes de poules a été effectué pour éliminer les gros fragments inutiles avant le pesage de la quantité nécessaire à la préparation du thé. Ensuite, le compost est mis dans un filet en mailles pour retenir les particules grossier, tout en permettant aux microorganismes bénéfiques de passer dans l'eau et pour faciliter la filtration à la fin d'infusion. Pour favoriser le développement des microorganismes, 5 kg de mâchefer ont été ajoutés dans chaque solution, servant comme biofiltre. L'apport d'oxygène dans la solution est assuré par une pompe à air de débit 2,5 litres /minute (150 litres/heure). L'extraction du thé est obtenue grâce au mouvement de l'eau (Figure.6).



Figure.6. Préparation d'infusion de thé de compost

III.2.2.3. Filtration du thé de compost

Une fois le temps d'infusion terminé, le thé de compost est filtré avec un tissu en mailles fines pour éliminer les résidus grossiers de la solution nutritive organique.

III.2.2.4. Détermination de la durée d'infusion optimale

Un premier essai de production de thé a été réalisé pour étudier la durée d'infusion optimale. Il s'agit d'une première production exploratoire de thé de compost (SB-1) et un thé mix compost et fientes de poule (SC-1) selon une concentration de 100g/l ou 10% de matière fraîche. Chaque solution a été répétée trois fois. Le volume d'eau utilisé pour la préparation de chaque solution est 15 litres (Figure.7).

- Pour la solution de compost (SB-1): 1,5 kilos de compost ont été mis dans 15 litres d'eau pour préparer le thé de concentration 100 g/l de matière fraîche. Cela équivaut à une solution de 7,9% de MS par litre car le KOMPOSTECO a 79 % de MS.
- Pour la solution compost + fientes (SC-1) : 1,125 kg de compost + 0,375 kg de fientes de poules ont été mis dans 15 litres d'eau pour obtenir la concentration 100g/l . Comme le compost a 79% de teneur en MS et 60% pour les fientes, les quantités en MS mis dans 15 litres d'eau

correspondent à 0,88 kg pour le compost et 0,225 kg pour les fientes. Par litre, cela fait donc 7,36% de MS.

L'infusion du thé a duré 10 jours. Cette durée a été choisie afin d'évaluer la dynamique de minéralisation au cours de l'infusion. De ce fait, des suivis des paramètres azotés (nitrate, nitrite, ammonium), phosphate, potassium, pH et EC de chaque solution nutritive ont été effectués au 3^{ème}, 7^{ème} et 10^{ème} jour pour déterminer le temps d'infusion optimal en fonction de l'évolution de la minéralisation.



Figure.7. Premier essai de production de thé

Suite à une contrainte de disponibilité de laboratoire d'analyse physico-chimique à Madagascar, un kit d'analyse colorimétrique JBL dédié à l'aquaponie (Figure.8) a été utilisé pour évaluer la teneur en nutriments des thés produits. Le test rapide JBL utilise des réactifs en poudre ou des gouttes à verser dans un échantillon de la solution à analyser. Ensuite, un nuancier de couleur permet d'identifier la concentration en minéral de l'échantillon. Toutefois, le kit a une faible ampleur de détection (Annexe.1) et ne fournit pas de précision sur la concentration identifiée. Les valeurs lues sur le nuancier de couleur correspondent à un intervalle de concentration. Le test JBL est très susceptible à des risques d'erreur notamment liés à l'usage d'une petite cuillère pour la mesure de poudre réactif, le titrage des gouttes, le mode d'agitation de la solution et la lecture de couleur sur le nuancier.

Le suivi de l'EC et pH de chaque type de thé a été effectué avec un Testeur EC /pH (Flintronic) (Figure.8). Un calibrage a été réalisé avant l'utilisation du pHmètre d'où la fiabilité des valeurs fournies.

Lors de cette étude, il a été aperçu que les concentrations en nutriments analysées dans les thés (Annexe.2 et.3) ne sont pas crédibles d'où la décision de ne pas les présenter dans la partie résultats ci-dessous. Les écarts-types sont nuls car les résultats obtenus à chaque répétition d'analyse sont identiques. De ce fait, seules les valeurs de pH et EC sont présentées et interprétées dans la partie résultats du rapport.



Source : Jbl.de , 2022

Figure.8. Les kits d'analyse utilisés (gauche : Testeur EC /pH (Flintronic), droite : JBL aquatest)

III.2.2.5. Détermination de la concentration d'infusion optimale

Selon la durée d'infusion optimale déterminée lors du premier essai, deux autres essais de production ont été menés successivement pour identifier la concentration optimale en matière fraîche à infuser. L'objectif de la réalisation des deux essais était de trouver la concentration en matière fraîche permettant d'obtenir un thé riche en nutriments avec au moins une EC supérieure à 1500 µS/cm. De ce fait, les concentrations en matières fraîches dans le thé ont été augmentées à 20 % (200g/l) et 40% (400g/l) par rapport au premier essai (100g/l ou 10%).

Les modalités testées sont :

➤ **Au cours du deuxième essai :**

- SB-2 : thé à base de compost dont la teneur en matière fraîche est 20%
- SC-2 : thé à base d'un mix 75 % compost + 25% fientes de poules (ratio en pourcentage massique de la masse fraîche) dont la teneur en matière fraîche est 20%

➤ **Au cours du troisième essai :**

- SB-3 : thé à base de compost tamisé dont la teneur en matière fraîche est 40%
- SC-3 : thé à base d'un mix 75 % compost + 25% fientes de poules tamisés (ratio en pourcentage massique de la masse fraîche) dont la teneur en matière fraîche est 40%

Au cours des essais, chaque modalité de thé a été répétée trois fois.

III.3. Essai de production de laitues biponiques

Deux essais de production biponique de laitues ont été effectués successivement pour explorer la technique de production optimale. Au cours du premier essai, les thés de compost (SB-2) et mix compost

fientes de poules (SC-2) à 20 % de concentration MF ont été comparés avec la solution témoin à base d'engrais soluble 1g/l (SA-2). Il a été également testé dans cet essai le pH libre et le renouvellement de la moitié de la solution nutritive à mi-récolte afin de s'assurer un apport suffisant en nutriments, et aussi dans l'hypothèse de formuler une simple routine de contrôle de la solution nutritive à proposer aux maraîchers de la ville d'Antananarivo.

Etant donné l'échec de ce premier essai de production de laitue, nous avons réalisé un deuxième essai en utilisant une concentration de 40% en MF pour les thés (SB-3 et SC-3) et 4g/l (SA-3) pour la solution témoin à base d'engrais soluble. Pour avoir une même EC de départ égale à 1500 µS/cm comme dans les thés (SB-3 et SC-3), le dosage de l'engrais soluble dans la solution témoin (SA-3) a été augmenté à 4g/l. Le pH a été ajusté à 6,5 pour toutes les solutions nutritives au cours de ce deuxième essai avec une solution acide JBL pH-Minus.

Tableau6. Modalités de thés testés pour l'essai de production de laitues

	Modalités	Type	Dosage	Contrôle de la solution nutritive	Contrôle du pH
Essai n°1 (29/06/22 au 04/08/22)	SB-2	Compost	20% en matière fraîche	Renouvellement de la moitié de la solution nutritive à mi-récolte	Libre
	SC-2	Compost + fientes de poules			
	SA-2	Engrais soluble	1g/ l		
Essai n°2 (15/08/22 au 21/09/22)	SB-3	Compost	40% en matière fraîche tamisé	Aucun	Ajusté à 6,5
	SC-3	Compost + fientes de poules			
	SA-3	Engrais soluble	4g/ 1 d'engrais soluble		

III.3.1. Dispositif expérimental

L'essai comporte 9 bassins de culture contenant 12 plantes chacune, correspondant à 3 répétitions de 3 types de solution nutritive. La disposition des bassins est randomisée.



III.3.2. Description du système hydroponique utilisé

Le système hydroponique choisi pour l'étude est le RAFT pour sa facilité de conception (Figure.9). Le bassin de culture est fait en bois couvert d'une plastique imperméable noir. Pour faciliter le suivi et éviter toute souillure à l'approche du sol, les bassins sont posés sur un support en bois de hauteur 70 cm pour être rehaussés à hauteur de l'homme.



Figure 9. Système de culture RAFT installé

Le bassin rectangulaire utilisé a une dimension de 70cm x 50 cm x 20cm. Chaque bassin est rempli à 73% soit 52 litres d'eau en contenance. Un volume de 156 litres est produit pour chaque type de solution nutritive à tester afin de remplir les 3 bassins de culture de 52 litres de volume.

La plaque flottante support de culture est faite en polystyrène ayant une épaisseur de 3cm, de dimensions 68cm x 48 cm pour protéger de lumière qui pourrait favoriser le développement des antagonistes à la culture. La plaque contient 12 trous de 5cm de diamètre distant de 15cm entre eux pour soutenir 12 pots de cultures troués remplis de substrat inerte et une plantule de laitue. Le pot de culture a les dimensions suivantes : 5,5 cm de diamètre supérieur, 2,9 cm de diamètre inférieur et 5 cm la hauteur.

Le mâchefer est le substrat de culture utilisé dans chaque pot de culture. Ce sont des sous-produits d'incinération, constitués par un mélange de métaux, de verre, de silice, d'alumine, de calcaire, broyés et mélangés à un liant le plus souvent la chaux. Le mâchefer subit un traitement de carbonatation qui stabilise les caractéristiques chimiques. Ce substrat est aussi très poreux (ADEME, 2020).

Avant son utilisation, le mâchefer est désinfecté avec de l'eau de Javel.

L'apport d'oxygène dans le bassin de culture est assurée par une pompe à air (SUPER PUMP SP-780), de débit 2,5 litre/minute ou 150 litre/ heure afin d'avoir une bonne aération. Une pompe est reliée à deux bulleurs dont chacun aère un bassin de culture.

Une bonne aération est essentielle car elle favorise l'apport nutritif et aide à la croissance d'organismes bénéfiques. L'aération du bassin de culture aide également à maintenir une température homogène tout en réduisant le développement des microorganismes indésirables (Sarlé, 2020).

III.3.3. Matériel végétal à tester

La laitue de variété locale « Bré » est testée dans cette étude pour une production hydroponique. C'est une culture qui a un cycle de production d'environ 45 jours.

III.3.4. Germination des laitues

Les laitues ont été semées dans un bac de culture avec un substrat sol, 14 jours avant la date prévue de transplantation.

III.3.5. Transplantation des laitues

Les plantules de laitues ont été immédiatement transplantées sur le système hydroponique dès que le thé filtré est transféré dans chaque bassin de culture. Les plants de laitue à stade de 2 à 3 feuilles bien développés âgés de 14 jours sont transplantés dans le système hydroponique le même jour pour les différentes modalités de solution nutritive. La racine des plantes a été rincée dans de l'eau pour éliminer le sol pouvant contaminer la solution nutritive. La mise en culture après transplantation a duré 36 jours pour le premier essai et 30 jours pour le deuxième essai de production de laitues.

III.4. Collecte de données

III.4.1. Suivis de la solution nutritive pendant la période de culture de laitues

Pour chaque solution nutritive testée, les teneurs en nitrate ont été analysées avec le test colorimétrique JBL, avant la mise place de la culture, à mi-culture et à la récolte. Un suivi tous les 2 jours de l'EC et pH de chaque solution nutritive a été aussi effectué avec un Testeur EC /pH (Flintronic). L'heure de suivi a été régulière (à 13h) pendant tous les essais.

Les valeurs obtenues lors de chaque suivi ont été enregistrées pour chaque bassin de culture.

Etant donné, l'incertitude sur les résultats des teneurs en nitrate analysées avec le test rapide colorimétrique JBL (Annexe.4), seules les données sur le pH et l'EC des solutions nutritives pendant la période de culture sont traitées dans la suite du document.

III.4.2. Suivis phénologiques des laitues

Cinq plantes ont été aléatoirement choisies et marquées dans chaque bassin de culture pour faire un suivi phénologique hebdomadaire au cours de l'expérimentation afin d'évaluer l'évolution et le comportement du végétal durant son cycle de culture face aux conditions du milieu nutritif. Les paramètres relevés chaque semaine sont la hauteur de la plus haute feuille à l'aide d'une règle graduée et le comptage du nombre des feuilles. A la période de récolte, le rendement pour chaque bassin de culture est évalué par la détermination de la masse foliaire fraîche en utilisant une balance numérique (KUBEI, 0,1 g de précision).

III.4.3. Evaluation de la production conventionnelle de laitues en milieu urbain

Une enquête semi-directive des maraîchers urbains a été effectuée parallèlement à l’expérimentation agricole le mois de juillet 2022. Pour cela, six maraîchers producteurs de laitues ont été sélectionnés au hasard dans 2 sites différents (Ambohimanarina et Ambanidja). L’objectif de cette enquête est d’évaluer les coûts et les bénéfices de production de laitues sur une durée de cycle de production afin de comparer la rentabilité économique avec une production de laitues en bioponie. Les thèmes abordés sont :

- La superficie de la parcelle
- L’itinéraire technique pour la production de laitues : travail du sol, calendrier cultural, densité de semis, la fréquence et volume d’arrosage
- Les contraintes de production rencontrées
- Les dépenses effectuées: nature, quantité, coût des produits fertilisants, les traitements phytosanitaires et main d’œuvre agricole
- Le rendement et prix de vente des produits

III.5. Traitement des données

Les données sur la croissance des plantes (hauteur, nombre de feuilles et masse foliaire fraîche) ont été analysées sur le logiciel R avec le package LME4 permettant de réaliser un modèle linéaire général mixte. Ce modèle permet de traiter les variables non-normalement distribuées et de réaliser par la suite un ANOVA. L’objectif est de déterminer s’il y a une dépendance significative entre les variables mesurées (masse foliaire fraîche, hauteur et nombre des feuilles) et les 3 types de solution nutritive utilisés. Un seuil de signification de $\alpha < 0,05$ a été appliqué pour tous les tests statistiques. Ensuite, la méthode de Tukey a été utilisée pour effectuer les comparaisons multiples des moyennes afin de dégager les différences significatives entre les systèmes au seuil de 5%.

Une conversion des valeurs des paramètres azotés NO_3^- en N-NO_3^- , NH_4^+ en N-NH_4^+ et NO_2^- en N-NO_2^- est employée dans ce rapport pour décrire les concentrations liées au seul poids d’atome d’azote dans la molécule.

Selon la conversion décrite par HACH (2022) :

- $\text{NH}_4^+ = 1,28 * \text{N-NH}_4^+$
- $\text{NO}_3^- = \text{N-NO}_3^- * 4,42664$
- $\text{NO}_2^- = 3,28 * \text{N-NO}_2^-$

Il est à noter que les résultats d’analyse des teneurs en nutriment sont présentés en annexe à cause de leur incertitude.

Pour l'analyse de la rentabilité économique, le ratio Valeur/ Coût (RVC) est calculé pour chaque type de solution nutritive utilisée en production bioponique de laitues comparé à celui de la production en pleine terre. Le calcul est réalisé sur un cycle de production. Le ratio valeur coût de chaque traitement a été fait en utilisant :

- La valeur de production qui est égale au prix de vente du rendement total obtenu sur le marché local
- Les coûts appliqués pour la réalisation de la culture : l'engrais, les mains d'œuvre, le traitement phytosanitaire, la consommation en eau, les matériaux pour le système hydroponique

La valeur du ratio valeur coût s'interprète comme suit :

- $RVC \leq 1$ signifie que la technique en question n'est pas économiquement rentable.
- $1 < RVC < 2$ veut dire que la technique nécessite une amélioration pour être diffusable.
- $RVC > 2$ implique que la technique est diffusable.

Partie.4. RESULTATS

VI.1. Evaluation de la qualité des thés de compost et la durée d'infusion optimale

IV.1.1. Résultats du premier essai de production de thé de compost de dosage 10%

La première phase de production de thé de compost a permis d'évaluer la durée d'infusion optimale à partir de l'interprétation des courbes d'évolution du pH et de l'électro conductivité. Les courbes représentent la moyenne des mesures pour chaque paramètre suivi.

La courbe rouge représente la modalité de thé de compost (SB-1) et la courbe en gris celle du mix compost + fientes de poule (SC-1), selon une concentration de 10% en matière fraîche.

IV.1.1.1. Evolution du pH lors du premier essai

Pour les deux modalités de thé SB-1 et SC-1, une même tendance est observée sur la courbe d'évolution du pH (Figure.10). Le pH augmente dans les trois premiers jours et tend à se stabiliser vers une valeur de pH égale à 8 jusqu'au 10^{ème} jour. L'augmentation du pH dans les trois premiers jours peut être expliquée par le processus de minéralisation qui libère des ions hydroxides. A partir du troisième jour, le pH est favorable pour le processus de nitrification.

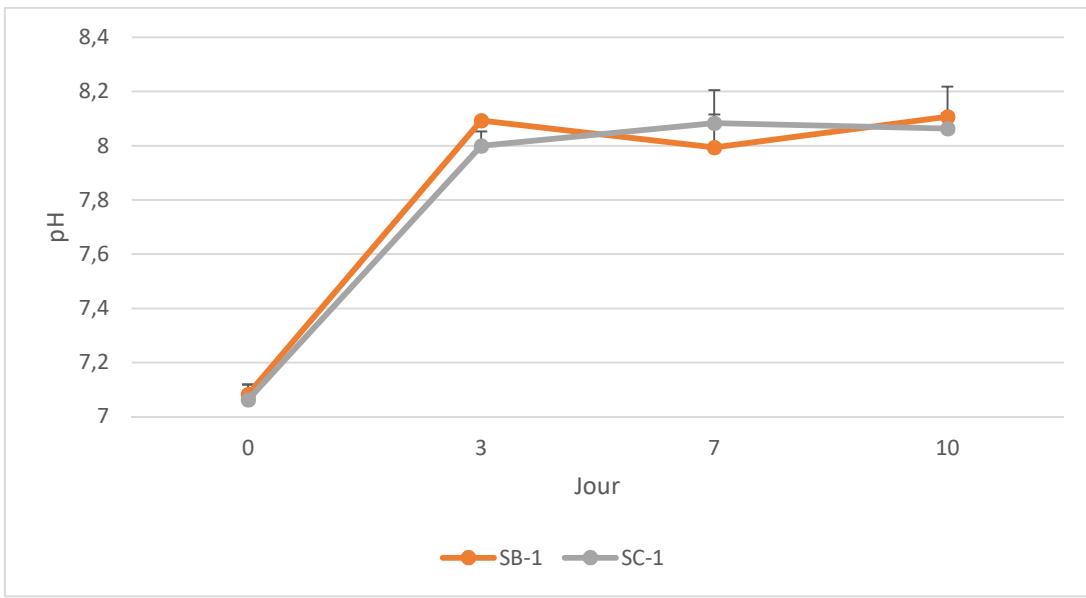


Figure.10. Evolution du pH durant l'infusion- Essai n°1

IV.1.1.2. Evolution de l'EC lors du premier essai

Une superposition des courbes d'évolution de l'électro conductivité est observée pour les deux types de thé SB-1 et SC-1 durant les 10 jours d'infusion (Figure.11). L'EC de départ varie entre 400 et 500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, puis atteint un maximum variant entre 600 et 700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ au troisième jour d'infusion. Une diminution progressive de l'EC est observée pour les deux types de thé à partir du troisième jour jusqu'à atteindre des valeurs entre 400 et 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$. L'augmentation de l'EC pendant les trois premiers jours est certainement en relation avec le processus de minéralisation de la matière organique par les microorganismes libérant ainsi plus d'ions dans le thé. Par ailleurs, il a été constaté sur la figure.10 ci-dessus que la valeur du pH a été favorable à la nitrification. Puis, l'absorption de certains minéraux pour le développement des microorganismes a probablement fait chuter l'EC au-delà du troisième jour d'infusion.

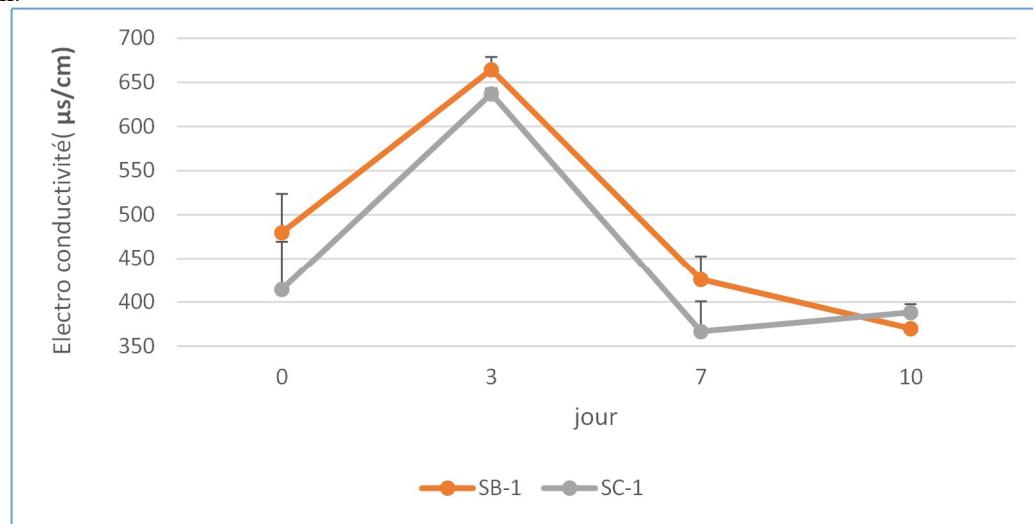


Figure.11. Evolution de l'EC durant l'infusion-Essai n°1

IV.1.2. Conclusion du premier essai de production de thé

La première production de thé de compost permet de tirer plusieurs recommandations.

Les courbes d'évolution du pH et EC suivent une même tendance pour les deux types de thé SB-1 à base de compost et SC-1 mix compost et fientes de poules. La valeur maximale est atteinte le 3^{ème} jour que ce soit pour le pH ou l'EC. Toutefois, les deux thés de compost testés s'avèrent plus faibles en éléments nutritifs qu'une solution hydroponique conventionnelle. L'EC maximale obtenue durant les 10 jours d'infusion est 664 µs/cm pour SB-1 et 637 µs/cm pour SC-1. Le pourcentage de matière fraîche 10% infusé n'est pas suffisant pour atteindre l'objectif d'une EC supérieure ou égale à 1500 µs/cm. L'insuffisance en élément nutritif des thés produits est aussi liée à la qualité du compost et les fientes de poule utilisée. Ils contiennent plus de 50% de copeaux de bois qui n'ont pas été enlevés avant l'infusion.

Le pH des solutions nutritives égal à 8 est trop élevé pour une culture hydroponique et nécessite encore un ajustement. Malgré, ces points faibles, la réalisation de la première production de thé de compost a permis d'identifier le temps d'infusion optimal qui est de 3 jours.

Toutes ces conclusions du premier essai ont permis d'améliorer la qualité des thés produits lors du deuxième essai de production.

IV.1.3. Caractéristiques des thés SB-2 et SC-2 produits lors du deuxième et troisième essai

Compte tenu des résultats du premier essai, des améliorations ont été apportées durant la seconde et troisième production des thés SB-2, SC-2, SB-3 et SC-3 de 156 litres chacune. Contrairement au premier essai de production de thé, un tamisage du compost et les fientes de poules a été effectué avec une fine maille de 2mm avant le pesage pour se débarrasser des éléments grossiers source de carbone pouvant favoriser la dénitrification. Le temps d'infusion est réduit à 3 jours. Un bulleur de 150 litres/heure a été utilisé dans chaque conteneur pour assurer l'oxygénéation du thé.

Parallèlement, ces thés ont été aussi comparés avec la solution à base d'engrais soluble SA-2 et SA-3.

- SA-2 : solution à base d'engrais soluble de 1g/l
- SB-2 : thé à base de compost dont la teneur en matière fraîche est 20%
- SC-2 : thé à base d'un mix 75 % compost + 25% fientes de poules dont la teneur en matière fraîche est 20%
- SA-3 : solution à base d'engrais soluble de 4g/l
- SB-3 : thé à base de compost tamisé dont la teneur en matière fraîche est 40%
- SC-3 : thé à base d'un mix 75 % compost + 25% fientes de poules tamisés dont la teneur en matière fraîche est 40%

La figure.12 ci-dessous présente les valeurs de pH pour les thés obtenus après 3 jours d'infusion et celles des solutions à base d'engrais soluble obtenues le même jour de préparation.

Une légère augmentation du pH est observée pour toutes les modalités lorsqu'on a augmenté la matière dissoute (Figure.12). Toutefois le pH des thés de compost et le mix avec des fientes de poules varie dans une gamme de 7,5 à 8 plus élevée que celle de la solution nutritive à base d'engrais soluble dont la valeur se situe entre 6 et 7.

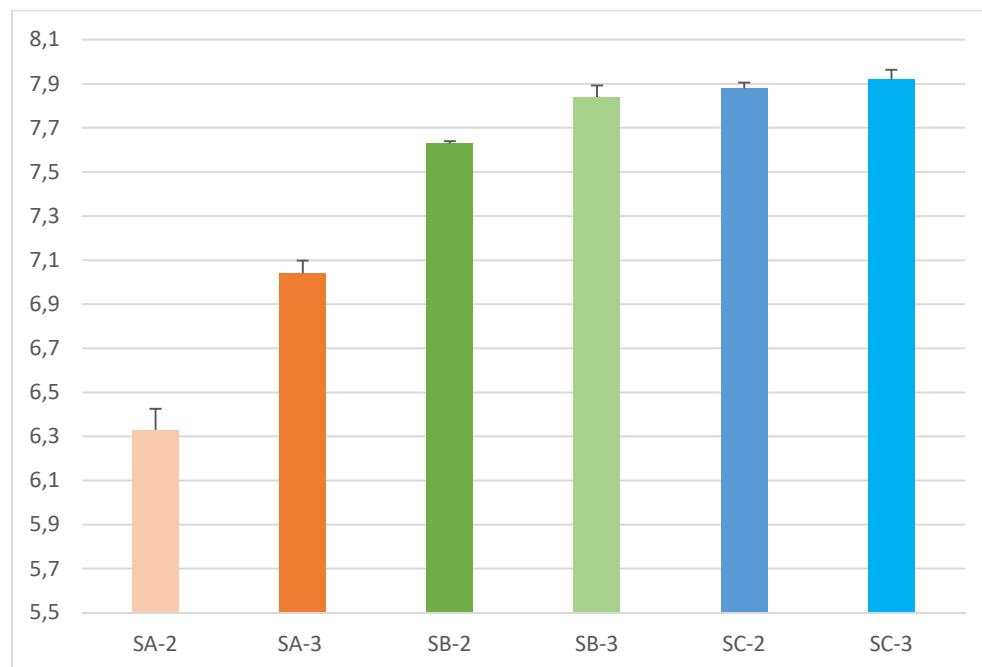


Figure.12. Valeurs de pH des solutions produites lors de second et troisième essai

On peut déduire de ce figure.13 qu'une corrélation positive est enregistrée entre la valeur de l'EC et la teneur en matière dissoute pour toutes les modalités de solution nutritive. Pour le thé SC-3, doubler la concentration en matière fraîche de 40% par rapport à 20% de celle de SC-2 et tamiser les composts et les fientes de poule ont permis d'atteindre une EC de 1602 µS/cm par rapport à 623 µS/cm pour SC-2, également pour SB-2 et SB-3 dont les valeurs sont respectivement 616 µS/cm et 1421 µS/cm. L'ajout de 4g/l d'engrais soluble a permis d'obtenir une EC de 1507 µS/cm pour SA-3 comparé à 484 µS/cm pour SA-1 composé de 1g/l.

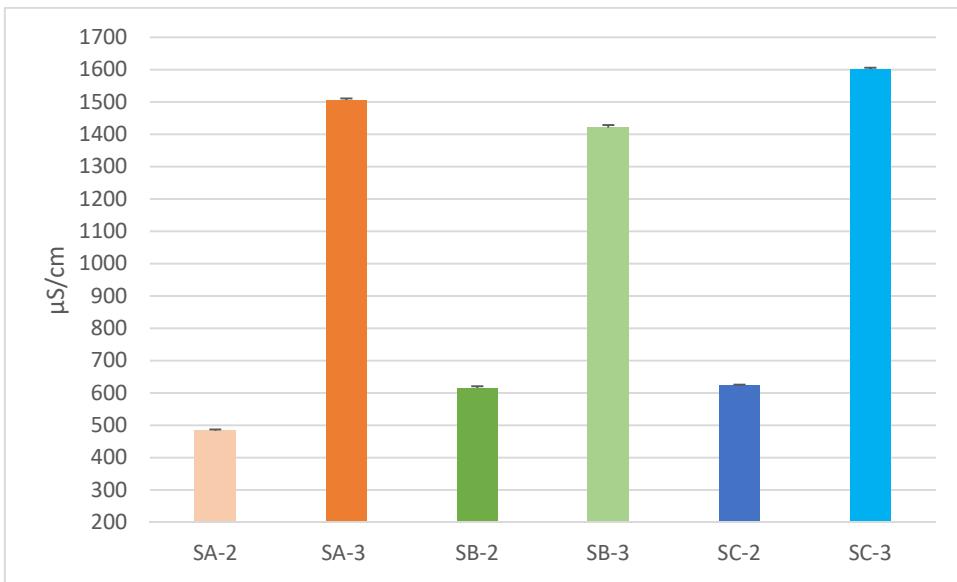


Figure.13. Valeurs de l'électro conductivité des solutions produites lors de second et troisième essai

VI.2. Essais de production des laitues

Un premier essai de production de laitues hydroponiques compare les trois types de solution SA-2, SB-2 et SC-2 sans avoir à ajuster le pH afin d'évaluer dans un premier temps l'évolution des nutriments au cours de culture surtout pour les thés dont le pH de départ est favorable pour la nitrification. Après 18 jours de plantation, la moitié de la solution est renouvelée par une récente préparation afin de combler les nutriments déjà consommés par les plantes.

L'objectif est de trouver une formulation de solution nutritive bioponique facilement reproductible par les maraîchers d'Antananarivo sans dépendance en réactif de rectification de pH.

Suite à l'échec du premier essai de production des laitues dont l'EC après le renouvellement de la solution nutritive était beaucoup trop élevée pour les plantes, un deuxième essai a été effectué pour comparer les modalités SA-3, SB-3 et SC-3 dont le pH a été ajusté à 6,5 tous les deux jours.

IV.2.1. Evolution du pH durant la phase de culture des laitues

Les suivis du pH de chaque solution nutritive ont permis de tracer les courbes ci-dessous lors du premier essai de production de laitues avec les solutions SA-2, SB-2 et SC-2 (Figure.14) et le deuxième essai de production avec SA-3, SB-3 et SC-3 (figure.15).

Il est remarqué de ces graphiques que le pH des trois solutions nutritives suit une même tendance d'évolution durant la phase de culture de laitue. Pour les deux essais effectués, une baisse de pH est observée la première semaine de plantation puis il remonte progressivement à mi-culture 18 jours après transplantation. Deux facteurs peuvent expliquer cette baisse de pH dont l'absorption de l'ammonium

par la plante et la nitrification qui induisent une libération des ions H⁺. Ceci sous prétend qu'il y a eu plus d'ammonium disponible que de nitrates dans les thés utilisés après les 3 jours d'infusion.

Pour les thés de compost mixé avec des fientes de poules, il est certain que la teneur en ammonium est beaucoup plus élevée. Au cours du temps, une partie de cet ammonium a été sûrement nitrifiée en ion nitrate par les microorganismes. Parallèlement à la nitrification, la minéralisation de l'azote organique en ammonium se poursuit aussi. Pourtant, le processus d'ammonification et l'absorption du nitrate par la plante augmentent le pH de la solution nutritive. Cela pourrait expliquer la montée du pH avant le renouvellement de la moitié de la solution le 18^{ème} jour au cours du premier essai.

Ensuite à partir du 21^{ème} jour, une chute progressive du pH est également mise en évidence pour les modalités thés de l'essai n°1 (figure.14) et l'essai n°2 (figure.15). Au cours du premier essai, la concentration en ammonium a certainement encore augmenté suite au renouvellement de la moitié de la solution nutritive, favorisant son absorption par la plante et l'acidification du milieu. La baisse de pH dans le deuxième essai peut être en relation avec la continuité du processus de minéralisation.

Il est aussi observé à partir de ces courbes que le pH de la solution SA à base d'engrais soluble varie dans une plage de 6 à 7,5 et sa courbe d'évolution est inférieure aux deux courbes de pH des thés SB et SC. De sa propriété d'engrais minéral, la solution SA contient moins de nutriment organique que les solutions de thé. Ce qui implique que le phénomène de minéralisation est certainement plus faible dans la solution SA comparée aux thés de compost.

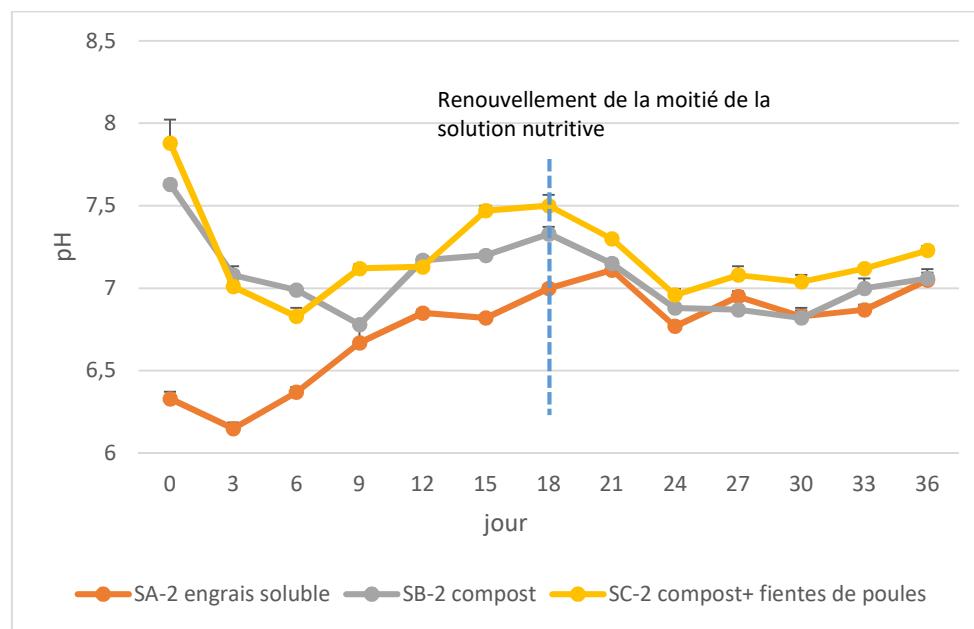


Figure.14. Evolution du pH pendant le premier essai de culture de laitues

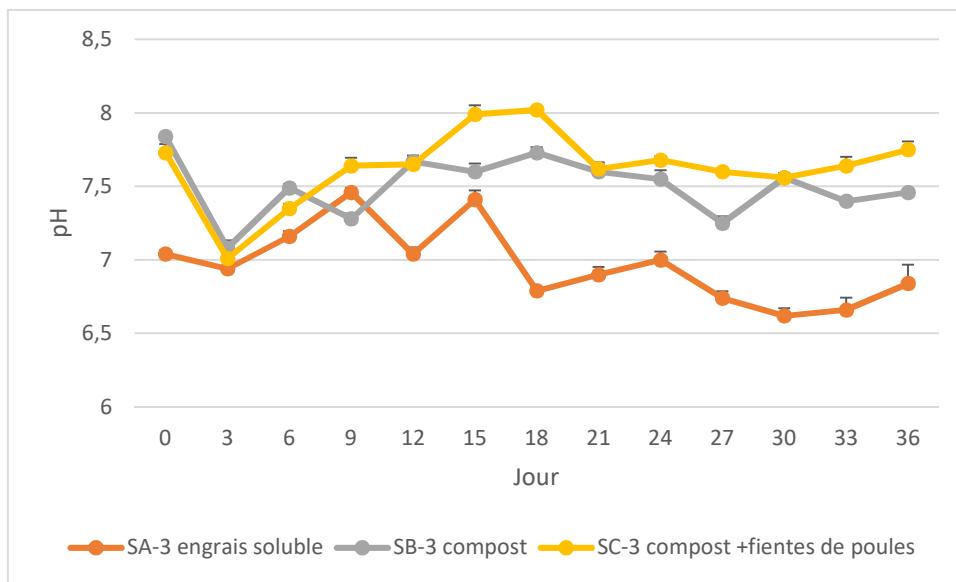


Figure.15. Evolution du pH avant ajustement au cours du deuxième essai de culture de laitues

Le contrôle du pH par une solution acide JBL pH-Minus a permis d'obtenir une stabilité des valeurs aux alentours de 6,5 pour les modalités SA-3, SB-3 et SC-3 (Figure.16).

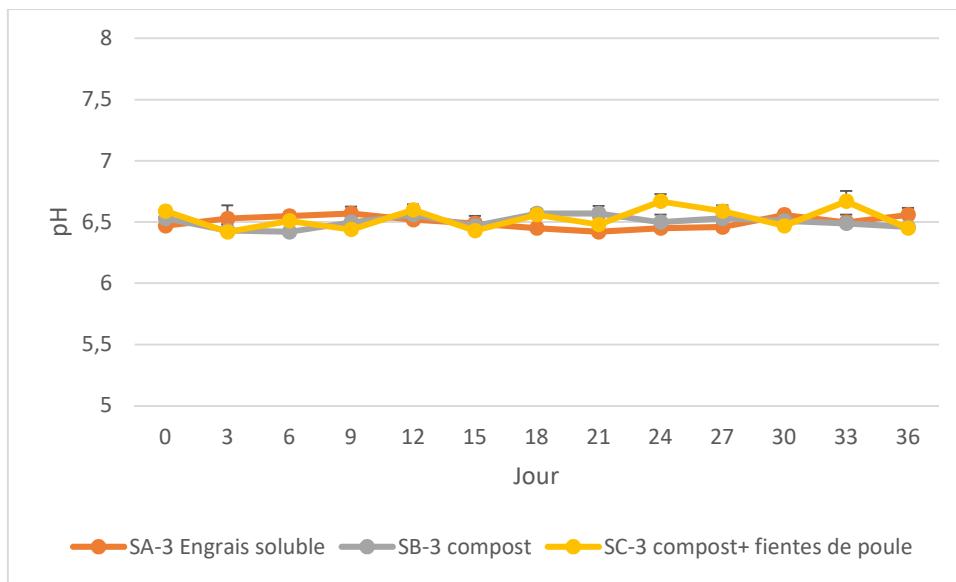


Figure.16. Evolution du pH après ajustement, au cours du deuxième essai de culture de laitues

IV.2.2. Evolution de l'EC durant la phase de culture des laitues

Les courbes ci-dessous présentent la tendance d'évolution de l'EC de chaque modalité de solution nutritive prise en parallèle avec la mesure du pH lors du premier et deuxième essai de production de laitue. Du faite de faible valeur des écart-types (Annexe.5), les barres d'erreur ne sont pas visibles sur les graphes.

Pendant l'essai n°1, l'EC des deux types de thés SB-2 et SC-2 augmente progressivement de 600 à 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pendant les deux premières semaines de plantation (Figure.17), probablement liée à la libération des ions suite à la minéralisation de la matière organique et de l'évaporation de l'eau qui concentrent de plus en plus la solution nutritive. Le renouvellement de la moitié de la solution nutritive de SB-2 et SC-2 le 18^{ème} jour n'a pas freiné l'augmentation de l'EC car la solution nouvellement apportée contient aussi de sels solubles. Au 36^{ème} jour, les thés SB-2 et SC-2 atteignent respectivement les valeurs de 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 4011 $\mu\text{s}/\text{cm}$ de conductivité alors que les valeurs optimales se situent entre 1200 et 1800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Sardare et al., 2013). L'électro conductivité de SA-2 a doublé à 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ après le changement de la moitié de la solution nutritive le 18^{ème} jour.

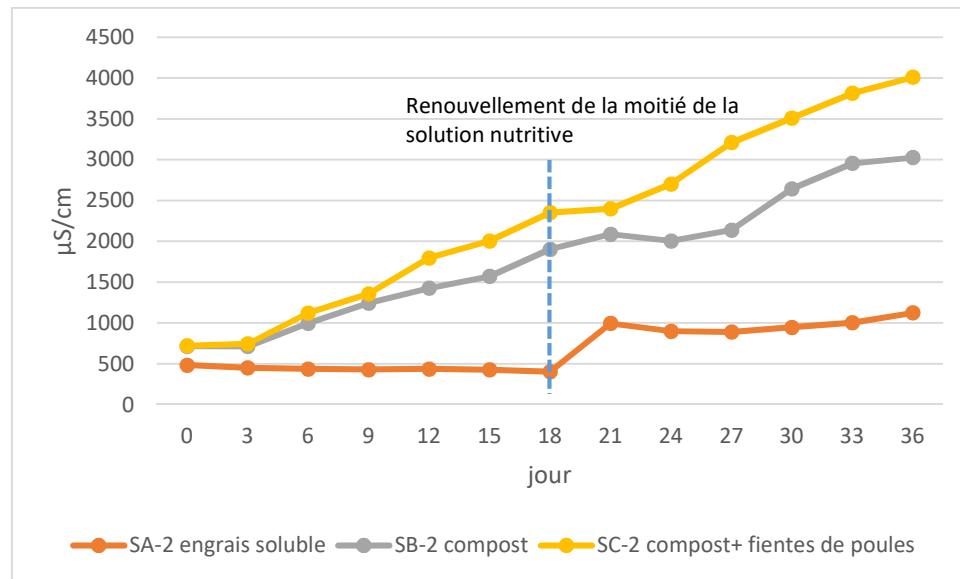


Figure.17. Evolution de l'EC au cours du premier essai de culture de laitues

Durant le deuxième essai de culture de laitue, l'EC de la solution SA-3 à base d'engrais soluble présente une diminution linéaire les deux premières semaines (Figure.18). Par opposition, l'EC des thés de compost SB-3 et SC-3 sont très instables et varient entre les valeurs de 1300 $\mu\text{s}/\text{cm}$ à 1900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avant l'ajustement du pH. Les minéraux absorbés par la plante sont certainement compensés par ceux libérés par la minéralisation dans les thés SB-3 et SC-3.

La courbe d'EC du thé SC-3 est supérieure à celle du SB-2 et SC-2. Cela pourrait être expliqué par la teneur élevée en azote des fientes de poules dans le thé SC-3.

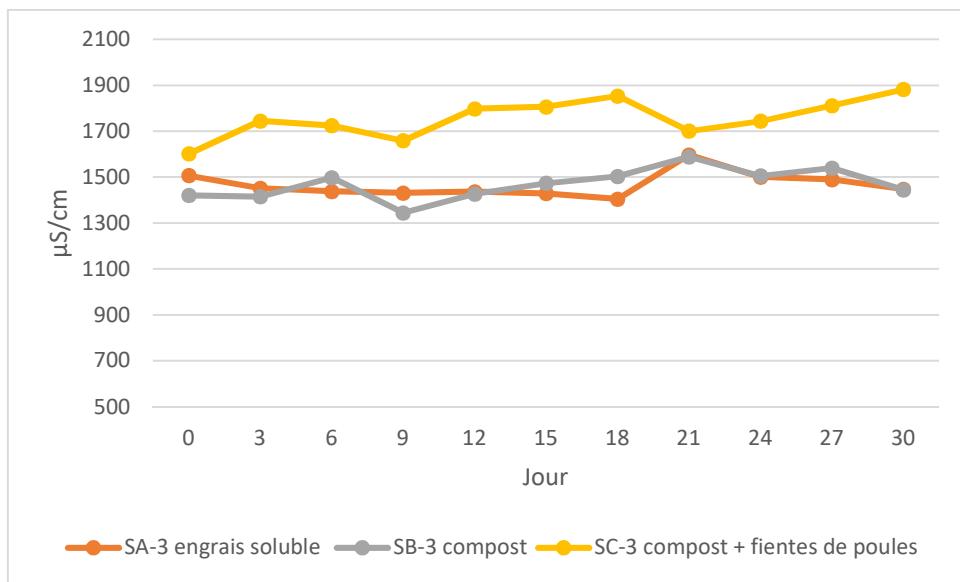


Figure.18. Evolution de l'EC avant ajustement du pH au cours du second essai de culture de laitues

En général, la réalisation des deux essais permet de constater que pour une même concentration de teneur en matière fraîche, les thés de compost mixés aux fientes de poules SC-2 et SC-3 présentent une EC plus élevé que les thés de compost SB-2 et SB-3. Les fientes de poules sont probablement plus riches en minéraux.

VI.3. Evaluation de la croissance des plantes

IV.3.1. Hauteur des plantes

Pendant le premier essai de culture sans contrôle de pH, les laitues ont bien développé avant le changement de la moitié de la solution nutritive le 18^{ème} jour, puis les plantes perdent leur feuilles âgées une par une. La différence significative se manifeste à partir du 18^{ème} jour après la transplantation (Tableau.7). Ce sont les laitues de la modalité SC-2 qui ont une vitesse de croissance la plus élevée, avec une hauteur moyenne de $10 \pm 1,08$ cm contre $8,12 \pm 0,74$ cm pour SA-2 et $8,62 \pm 1,08$ cm pour SB-2 (Figure.19). A partir du 24^{ème} jour, l'EC des solutions SB-2 et SC-2 a fortement augmenté dépassant 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ d'où la taille des plantes n'a plus évolué (Figure.22). De plus, le pH des solutions nutritives a été supérieur aux valeurs recommandées pour l'hydroponie ($\text{pH} > 6,5$), ce qui a impacté la disponibilité des nutriments.

En fin de culture, il a été remarqué que la taille des laitues des solutions SB-2 et SA-2 a dépassé celle de SC-2 dont la toxicité a été très tôt atteinte. Les plantes des modalités SA-2 ont continuellement développé même après la modification de la solution nutritive car leur EC n'a pas dépassé les 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

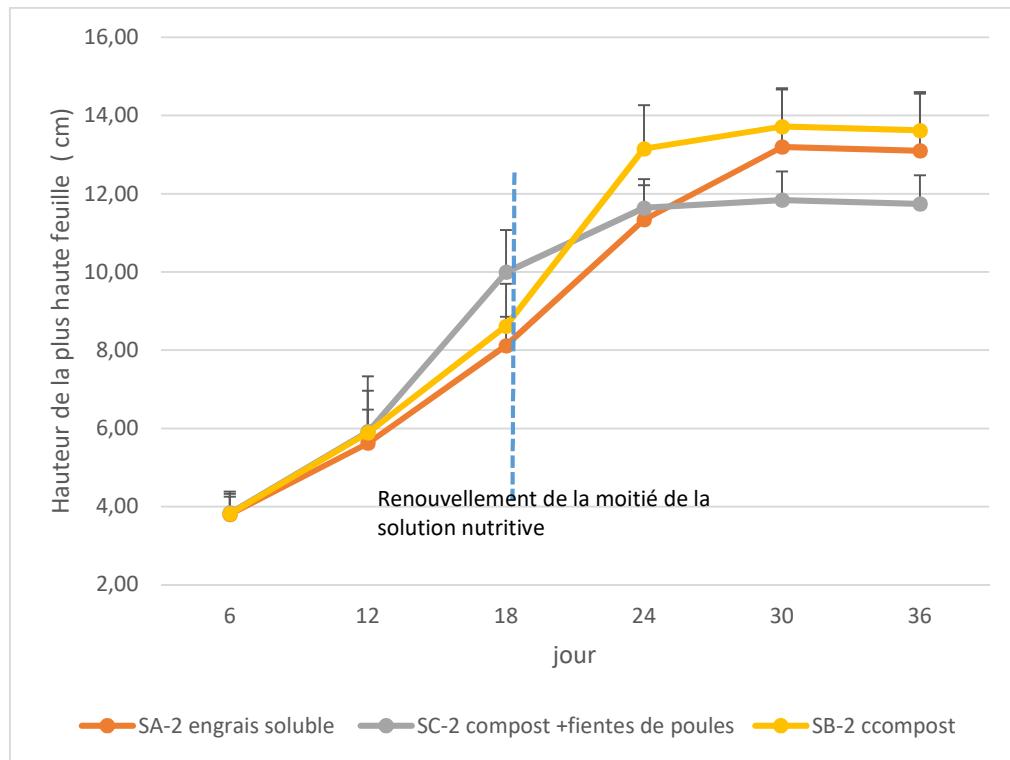


Figure.19. Evolution de la hauteur des laitues au cours du premier essai de culture

Tableau 7. Récapitulatif des hauteurs de plantes au cours du premier essai de culture

Hauteur des plantes	SA-2	SC-2	SB-2
6 ^{ème} jour	3,81 ± 0,45 a	3,84 ± 0,49 a	3,82 ± 0,57 a
12 ^{ème} jour	5,63 ± 0,85 a	5,92 ± 1,04 a	5,89 ± 1,44 a
18 ^{ème} jour	8,12 ± 0,74 a*	10 ± 1,08 c*	8,62 ± 1,08 bc*
24 ^{ème} jour	11,34 ± 0,88 a	11,64 ± 0,73 a	13,15 ± 1,11 b
30 ^{ème} jour	13,2 ± 1,46 ab*	11,84 ± 0,73 b*	13,72 ± 0,98 a*
36 ^{ème} jour	13,1 ± 1,46 ab*	11,74 ± 0,73 b*	13,62 ± 0,98 a*

*p-value <0.05

L'ajustement du pH dans les valeurs comprises entre 6 et 6,5 a favorablement amélioré la croissance des laitues lors du deuxième essai. Dans cet essai, les valeurs de pH sont optimales pour faciliter l'absorption des nutriments par la plante. Les laitues les plus développées sont celles de la modalité SC-3 avec $20,72 \pm 1,00$ cm de hauteur (Figure.20). En effet, le thé SC-3 se distingue par l'ajout des fientes de poules qui sont reconnues très riches en matière azotée.

Aucune différence significative n'est observée sur les laitues des modalités SB-3 et SA-3 dont les hauteurs moyennes sont respectivement $18,14 \pm 0,12$ cm et $18,72 \pm 0,25$ cm (Tableau.8).

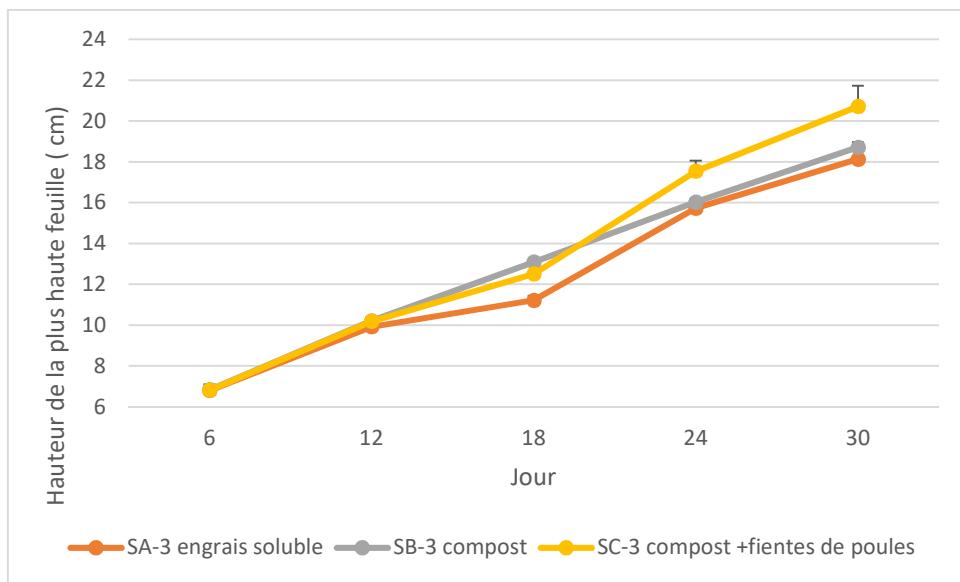


Figure.20. Evolution de la hauteur des laitues au cours du second essai de culture

Tableau8. Récapitulatif des hauteurs de plantes au cours du deuxième essai de culture

Hauteur des plantes	SA-3	SC-3	SB-3
6 ^{ème} jour	6,81 ± 0,10 a	6,82 ± 0,11 a	6,84 ± 0,25 a
12 ^{ème} jour	9,92 ± 0,10 a	10,19 ± 0,20 a	10,22 ± 0,06 a
18 ^{ème} jour	11,22 ± 0,21 a*	12,52 ± 0,37 ab*	13,1 ± 0,12 b*
24 ^{ème} jour	15,74 ± 0,44 a*	17,55 ± 0,50 b*	16,04 ± 0,04 ab*
30 ^{ème} jour	18,14 ± 0,12 ab*	20,72 ± 1,00 b*	18,72 ± 0,25 a*

*p-value <0.05

IV.3.2. Nombre des feuilles

Lors du premier essai, le comptage des feuilles des échantillons de plantes par modalité montre qu'il y a eu une bonne croissance des plantes avant le renouvellement de la solution nutritive. L'effet des différentes modalités de solution nutritive sur la croissance des laitues n'était pas encore différenciable avant le renouvellement de la solution nutritive le 18^{ème} jour (Tableau.9). En 24 jours, les plantes de la solution SB-2 ont atteint 10 ± 1,56 feuilles contre 9 ± 0,93 feuilles pour SC-2 et 8 ± 0,74 feuilles pour SA-2. Puis, le renouvellement de la solution nutritive a négativement impacté les plantes de SB-2 et SC-2 car l'EC a dépassé le seuil maximal tolérable pour la plante. Les feuilles de laitues de SB-2 et SC-2 jaunissent et sont fanées de jour en jour, et une régression du nombre de feuilles a été enregistrée (figure.21 et.22).

Tableau9. Récapitulatif du nombre de feuilles par plante au cours du premier essai de culture

Nombre des feuilles	SA-2	SC-2	SB-2
6 ^{ème} jour	5 ± 0,46 a	5 ± 0,35 a	5 ± 0,46 a
12 ^{ème} jour	5 ± 0,01 a	5 ± 0,65 a	5 ± 0,53 a
18 ^{ème} jour	6 ± 0,41 a*	7 ± 0,74 b*	7 ± 0,52 b*
24 ^{ème} jour	8 ± 0,74 a*	9 ± 0,93 ab*	10 ± 1,56 b*
30 ^{ème} jour	9 ± 0,74 ab*	8 ± 0,93 a*	10 ± 1,56 b*
36 ^{ème} jour	9 ± 0,74 a*	6 ± 0,93 b*	9 ± 1,56 a*

*p-value <0.05

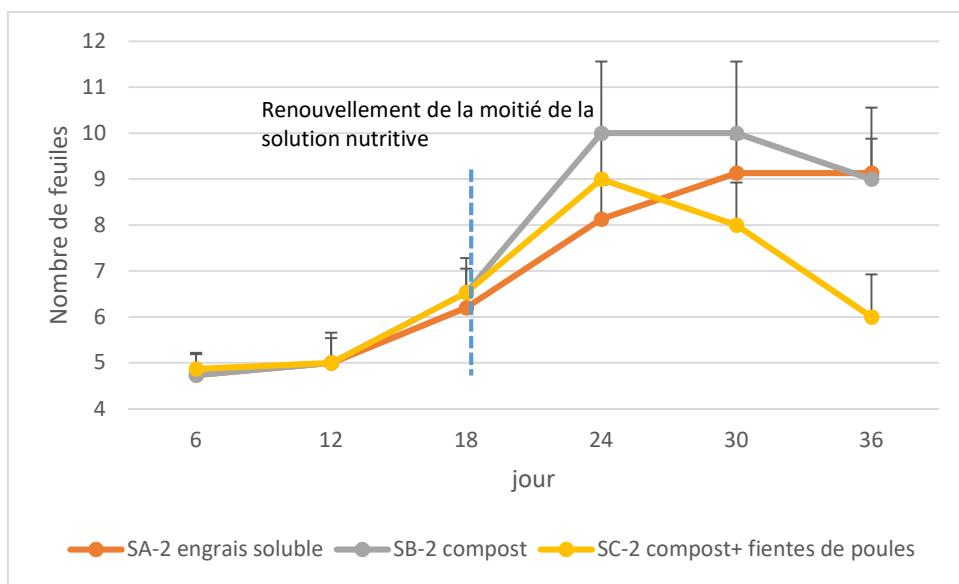


Figure.21. Evolution du nombre de feuilles des laitues au cours du premier essai de culture



Figure.22. Perte des feuilles après renouvellement de la moitié des solutions nutritives

Les ajustements du pH effectués lors du deuxième essai ont permis d'obtenir une bonne croissance des laitues dans les trois types de modalités (Figure.23). Le développement foliaire et la circonférence des laitues sont identiques pour SA-3, SB-3 et SC-3 à la récolte (Tableau.10). Les laitues produites comportent toutes 18 feuilles au 30^{ème} jour et elles atteignent la taille commercialisable (Figure.24).

Tableau10. Récapitulatif du nombre de feuilles par plante au cours du deuxième essai de culture

Nombre des feuilles	SA-3	SC-3	SB-3
6 ^{ème} jour	6 ± 1,52 a	6 ± 1,15 a	6 ± 1,50 a
12 ^{ème} jour	8 ± 1,15 a	8 ± 2 a	8 ± 2 a
18 ^{ème} jour	9 ± 1,52 a*	10 ± 1,54 b*	10 ± 2 b*
24 ^{ème} jour	12 ± 2 a*	14 ± 2 b*	13 ± 2,51 ab*
30 ^{ème} jour	18 ± 2 a	18 ± 2 a	18 ± 1,16 a

*p-value <0.05

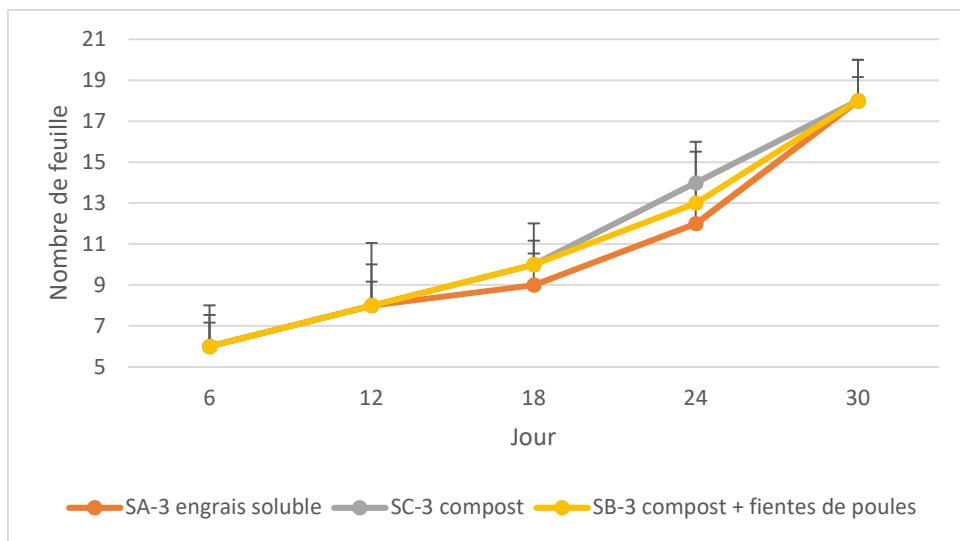


Figure.23. Evolution du nombre de feuilles des laitues au cours du second essai de culture

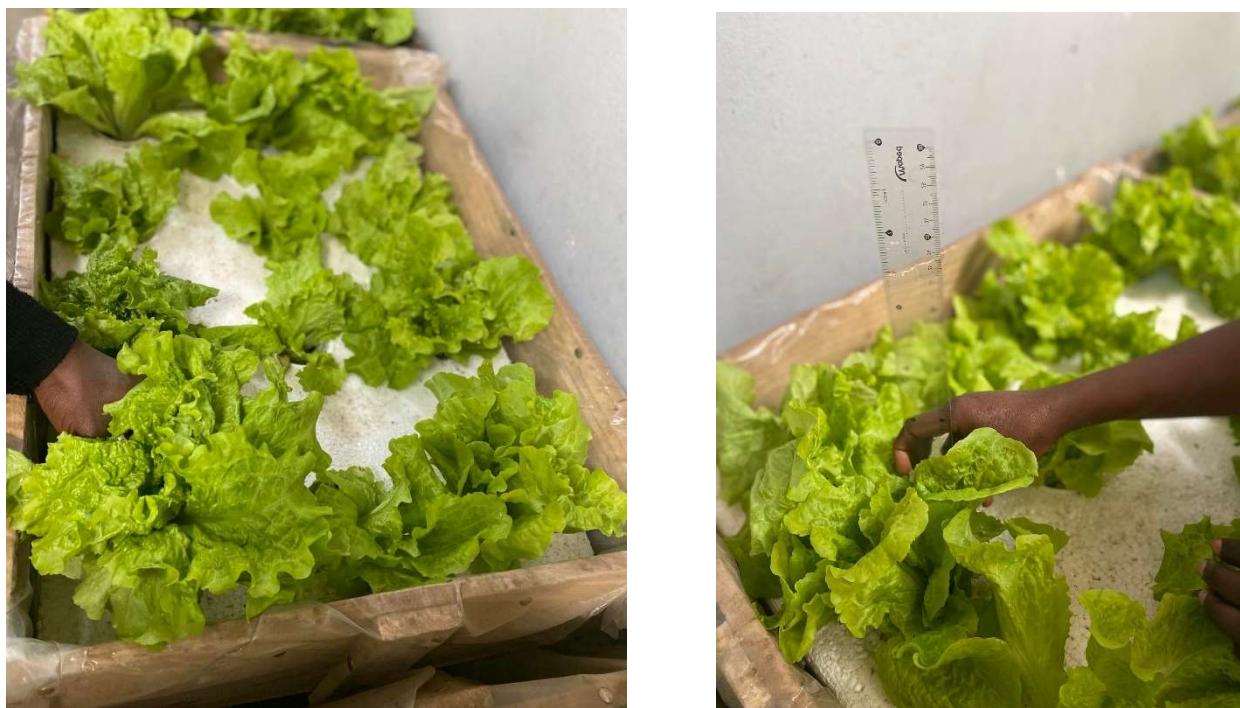


Figure.24. Taille des laitues obtenue au cours du deuxième essai de culture

Lors du premier essai, le rendement obtenu par les trois types de modalité n'est pas satisfaisant. La masse moyenne de laitues fraîches la plus élevée est $27 \pm 4,32$ g obtenue par SA-2 et SB-2 après 36 jours de culture, si la masse commerciale attendue est d'au moins 50 g par laitue. Aucune différence significative n'est observée entre SA-2 et SB-2 (Figure.25 Essai n°1). La plus grosse perte a été enregistrée sur SC-2 dont l'EC a très vite dépassé 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ après le renouvellement de la moitié de la solution nutritive.

La masse moyenne foliaire des laitues a nettement augmenté lors du deuxième essai. Les laitues obtenues sur le thé de compost mixé aux fientes de poules (SC-3) sont significativement différentes de celles des deux autres modalités compost (SB-3) et de la solution à base d'engrais soluble (SA-3). La masse de laitues fraîches la plus élevée est $92 \pm 3,90$ g obtenue par SC-3 contre $61 \pm 4,36$ g pour SB-3 et $60 \pm 3,85$ g pour SA-3 (Figure.25 Essai n°2). Ces valeurs peuvent être expliquées par la courte durée de l'expérimentation en comparaison avec un cycle complet de culture. Ces laitues auraient pu encore se développer si la récolte n'a pas été faite plus tôt par rapport au temps imparti à cette étude.

En plus, le soulèvement fréquent de la plaque, pour l'agitation manuellement de l'eau afin d'éviter l'accumulation des fines particules au fond du bac de culture, a certainement laissé la pénétration de la lumière, favorisant le développement des algues observées sur les parois du bac de culture. Ces algues ont certainement limité la croissance des plantes en étouffant les racines.

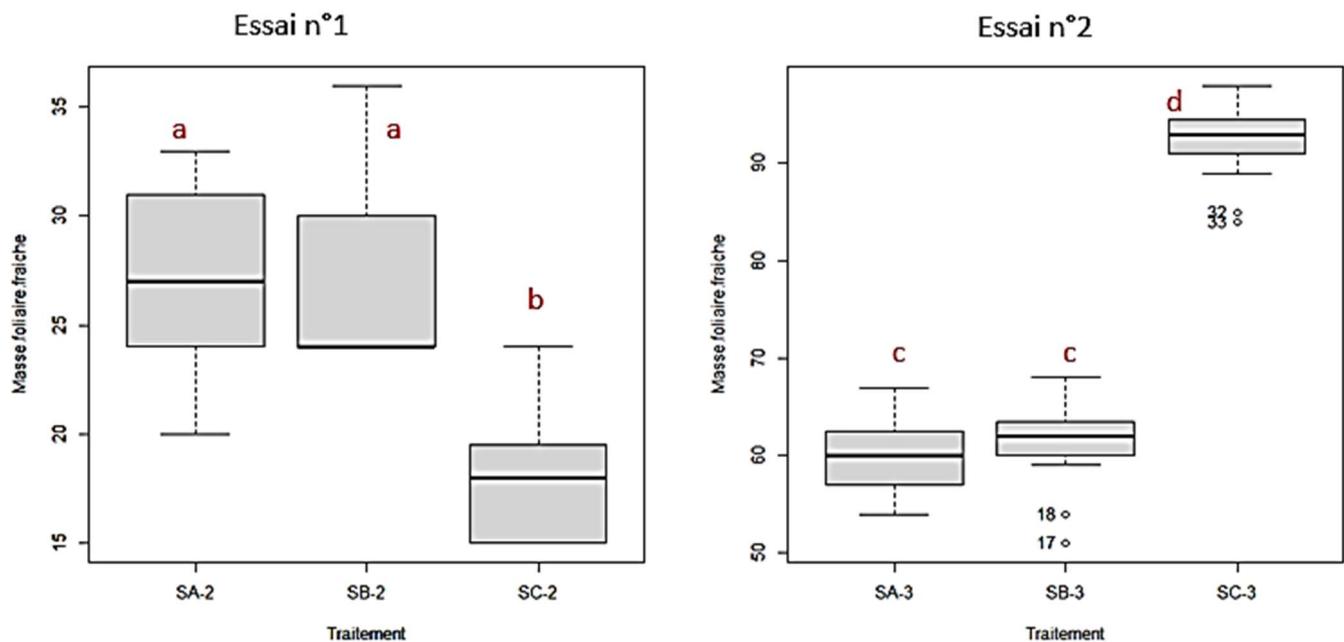


Figure.25. Masse foliaire fraîche des laitues au cours du premier et second essai de culture

VI.4. Analyse de la rentabilité économique du système de culture bioponique

Le système RAFT proposé dans cette étude est fait à base des matériaux accessibles localement. L'unité du système coûte environ 45 euros pour une table de culture de $1 m^2$. Le tableau.11 ci-dessous présente les prix détaillés du système.

Tableau11. Coût du système RAFT

	Prix en Ariary
Bac de culture 1m ² + support 70cm haut	60 000
Réservoir d'eau 60 litres	80 000
Pompe à air de débit 2,5 litres /minute	50 000
Substrat mâchefer 5 kg	2 500
Polystyrène plaque de culture	5 000
Pots de culture	3 600
Total	201 100

Ensuite, en évaluant la rentabilité économique (Tableau.12) et les données du rendement de notre étude, il est constaté parmi les 3 types de solution nutritive testés en RAFT que le traitement SC-3 mix fientes de poules et compost obtient un RVC le plus élevé de 1,85. Cela signifie que ce type de production est économiquement le plus avantageux. Il procure moins de rendement ($3,24 \text{ kg/m}^2$) qu'une culture en pleine terre (4kg/m^2), mais il est plus rentable car les charges de production sont inférieures à celles de la culture en pleine terre. Produire des laitues en pleine terre coûte donc plus cher qu'en bioponie sur un système RAFT si on tient compte de toutes les charges de production (traitement phytosanitaire, engrais, main d'œuvre, consommation en eau).

L'analyse économique montre que le thé de compost SB-3 a le même RVC (1,66) que la culture en pleine terre. Cela s'explique aussi par rapport aux charges de production moins élevées que celles de la culture en pleine terre. Bien que le traitement SA-3 a obtenu le même rendement $2,16 \text{ kg / m}^2$ que SB-3, l'utilisation d'engrais soluble chimique génère une rentabilité négative due à son coût très élevé (75 000 Ar/kg) par rapport au prix du compost (210 Ar /kg).

On constate aussi que la culture conventionnelle de laitues en pleine terre utilisant le fumier et engrais chimique NPK a différent charges de production liées à la consommation en eau, l'arrosage, le travail du sol et les traitements phytosanitaires mais son rendement est supérieur à la culture bioponique utilisant le mix de compost et de fientes de poules (SC-3).

Tableau 12. Evaluation de la rentabilité économique des modes de culture de laitues conventionnel et hydroponique

		Culture conventionnelle		Culture hydroponique						
		FUMIER		COMPOST (SB-3)		Compost + Fiente de poule (SC-3)		Engrais soluble (SA-3)		
Superficie en m ²		1		1		1		1		
	Unité	P.U	Q.U	Montant	Q.U	Montant	Q.U	Montant	Q.U	Montant
VALEUR DE PRODUCTION (Laitues)	kg	5 000	4	20 000	2,16	10 800	3,24	16 200	2,16	10 800
CHARGE DE PRODUCTION				0		0		0		0
Semence		1 000	0,1	100	0,1	100	0,1	100	0,1	100
Engrais et amendement :				0		0		0		0
Fumier du paysan	kg	210	4	840	0	0	0	0	0	0
NPK	kg	40 000	0,1	4 000		0		0		0
Compost	kg	210		0	29,71	6 239	22,28	4 679	0	0
fientes de poules	kg	510		0		0	7,42	3 788		0
Engrais soluble DEMARRAGE	kg	75 000		0		0		0	0,59	44 250
Consommation en eau durant le cycle	litres	25	135	3 375	5,94	149	5,94	149	5,94	149
Consommation en électricité	KWH	600			0,01	6	0,01	6	0,01	6
Traitement phytosanitaire		20 000	0,1	2 000		0	0	0	0	0
Travail du sol	HJ	10 000	0,01	100		0	0	0	0	0
Désherbage et transplantation	HJ	10 000	0,02	200		0		0		0
Arrosage par jour	HJ	5 000	0,3	1 500		0		0		0
Contrôle de la solution nutritive	HJ	625			0,03	19	0,03	19	0,03	19
(1)TOTAL DES CHARGES				12 115		6 512		8 741		44 523
(2)COUT DE PRODUCTION (Ar/kg)				3 028,75		3 014,98	0,00	2 697,72	0,00	20 612,62
(3)TOTAL DES REVENUS (Ar)/ m²				7 885		4 288	3	7 459	2	-33 723
(4)Ratio valeur/coût (RVC)				1,65		1,66		1,85		0,24

Partie.5. DISCUSSIONS

V.1. Dosage et durée d'infusion du thé de compost

L'essai préliminaire de production de thé de compost SB-1 et SC-1 avec fientes de poules a démontré que le temps d'infusion optimale rencontré dans cette étude se situe au 3^{ème} jour d'infusion. L'étude de Radin et Warman (2011) montre une durée d'infusion optimale de 3 jours, et celle de Tikasz et al. (2019) de 2 jours.

Selon Ingham E. (2005), la durée d'infusion et l'oxygénation influencent la qualité du thé. Plus le temps d'infusion est court, moins il est probable que des microorganismes anaérobies puissent se développer. Il existe un équilibre entre l'extraction des nutriments et la croissance des organismes, donnant un temps optimal pour la production du thé, en fonction des conditions exactes de brassage.

Il a été constaté dans notre étude qu'au-delà du troisième jour d'infusion, le pH tend à se stabiliser vers une valeur 8. Grady et al.(1980) confirment que la nitrification est optimum pour un pH élevé.

La chute de la conductivité au bout du troisième jour d'infusion peut être attribuée à la diminution des ions solubles fixés durant la prolifération des microorganismes aérobies. La précipitation des ions sous forme de sels minéraux insolubles ou la volatilisation ammoniacale en corrélation positive avec la valeur de pH du thé supérieure à 7,5 ont probablement aussi induit la chute de la conductivité (Bugbee B., 2003).

Ajouté à cela, Ingham (2005) explique aussi l'importance de la bonne oxygénation durant la phase d'extraction du thé. Durant nos essais de production de thé, le développement des organismes dénitritifiantes a été probablement favorisé par la faible concentration en oxygène. Le bulleur de 150 litres par heure utilisé n'est pas suffisant pour fournir une oxygénation adéquate pendant l'infusion de thé de 150 litres de profondeur 50cm. Pour avoir une oxygénation suffisante, un ratio standard de 1 pour 1 est conseillé entre la pompe à air et le volume d'eau tout en tenant compte que le débit d'aération diminue en fonction de la profondeur de l'eau (Ingham, 2005).

Il ressort également de l'essai préliminaire que le thé produit a une EC faible de 700 µs/cm. Aussi, la concentration en matière fraîche de 10% ne semble pas être suffisante. L'augmentation de la concentration en matière fraîche à 20% et 40% lors du second et troisième essais de production ainsi que le tamisage du compost et des fientes de poules avant infusion ont nettement augmenté les matières solubles ainsi que la conductivité. Une corrélation positive entre la quantité en matière dissoute et les teneurs en nutriments a été également rapportée par Tikasz et al.(2019) lors d'un essai comparant trois concentrations (10, 25 et 50g/l) de solution nutritive à base de fientes. La concentration en fientes 50g/l est le dosage également montré comme optimal par Tikasz et al.(2019) , cela correspond à la concentration en fientes de poules du SB-2 dans la présente étude.

V.2. Evolution du pH durant la phase de culture

Lors de nos essais, une baisse du pH a été enregistrée la première semaine après transplantation. Cela peut être liée à l'absorption de l'ammonium par la plante et la nitrification pendant lesquelles il y a libération des ions H⁺. On peut donc estimer que les thés infusés pendant 3 jours contiennent encore plus d'ammonium que de nitrates. Tikasz et al. (2019) ont aussi trouvé une concentration de N-NH4⁺ (35 mg/l) plus élevée que N-NO3⁻ (11,7 mg/L) dans le thé à base de fumier de dinde infusé pendant 2 jours.

Le développement des plantes avant le renouvellement de la solution nutritive pendant notre premier essai indique que la concentration en ammonium dans les solutions de thé n'était pas toxique pour les plantes. Par ailleurs, Nelson (2011) affirme que la plante peut supporter une concentration en ammonium jusqu'à 40% de la teneur en azote total. Au cours de la première semaine de culture, la baisse de pH peut aussi être expliquée par la phase d'acclimatation de la plante à son nouvel environnement après le transfert de la pépinière sur substrat sol vers le système hydroponique, et qu'au cours de cette transition l'absorption des nutriments y compris le nitrate est plus faible (Lind et al., 2020). De plus, une augmentation de température de l'eau a été constatée les premières semaines (Annexe.6), entraînant probablement une absorption limitée en ions.

Ensuite, l'augmentation des valeurs du pH à 7,5 avant le renouvellement de la solution nutritive, est un bon indicateur de l'absorption du nitrate par la plante. Bien que la majorité des nutriments soient indisponibles au-delà d'un pH supérieur à 6,5 en hydroponie conventionnelle, Texier (2013) affirme que les plantes en bioponie peuvent supporter un pH jusqu'à 7,5. Aussi, la minéralisation de la matière organique par les microorganismes est un facteur en plus qui basifie le milieu.

Au cours du deuxième essai de culture de laitues, bien qu'on a ajusté le pH à 6,5 tous les deux jours, il est tout de même remarqué par la figure.15 que les valeurs oscillent entre une gamme de 7 à 8 avant l'ajustement du pH. Cette valeur de pH reste favorable pour la nitrification (Grady et al. 1980).

La chute progressive du pH à partir du 21^{ème} jour de culture, observée dans le deuxième essai, concorde avec l'augmentation de la masse racinaire dans la solution de thé qui favorise la place pour le bon développement des microorganismes décomposeurs (Lind et al., 2020). La minéralisation est beaucoup plus intense suite à la croissance des bactéries nitrifiantes attachées à la racine. C'est cette minéralisation qui contribue à la baisse du pH.

D'un point de vue général, les courbes d'évolution du pH des deux types de thé de compost et celui mixé avec les fientes de poules sont très similaires. Cette tendance a été aussi remarquée par Supattra (2014). En effet, la température similaire des deux thés pourrait libérer les mêmes nutriments.

V.3. Evolution de l'EC durant la phase de culture

Il a été constaté lors du premier essai de production de laitue, une diminution de 4% du volume de la solution nutritive dans tous les bassins de culture avant le renouvellement des solutions.

L'augmentation progressive de l'EC dans tous les bacs de culture a été observée en même temps que l'augmentation de la température de l'eau du 3^{ème} au 18^{ème} jour (Annexe.6). Les plantes ont certainement absorbé plus d'eau que d'ions due à la température chaude. Ajouté à cela, la continuité du processus de minéralisation peut aussi expliquer la hausse d'EC au cours de la culture. Le renouvellement de la moitié de la solution nutritive le 18^{ème} jour a encore empiré l'augmentation de l'EC. Les plantes commencent à faner et leur absorption minérale est réduite, conduisant aussi à la concentration en ions de la solution nutritive.

Pendant le premier essai de culture de laitues, le pH supérieur à 7 sans ajustement a favorisé la minéralisation ainsi qu'une augmentation de l'EC. Renouveler uniquement la moitié de la solution nutritive n'était pas une solution efficace pour diminuer le pH et l'EC car cela a même reconcentré la solution nutritive. Dans son expérimentation de culture bioponique Tikasz *et al.* (2019) a changé la totalité de la solution nutritive tous les 14 jours.

Lors du second essai de production de laitues, une stabilisation de l'EC est observée après ajustement du pH à 6,5 pour les thés de compost (SB-3) et ceux mixés avec des fientes de poules (SC-3). En effet, l'absorption minérale des plantes hydroponiques est favorable dans cette gamme de pH (Bugbee B., 2003), ce qui pourrait probablement stabiliser la concentration en ions libérés dans la solution nutritive suite à la minéralisation des matières organiques par les microorganismes.

V.4. Effet des thés de compost sur la croissance et rendement des laitues

Les laitues cultivées sans contrôle de pH durant la première expérimentation ont continué à pousser jusqu'à ce que l'EC dépasse 2000 µS/cm après le renouvellement de la moitié de la solution nutritive le 18^{ème} jour. L'EC trop élevée a entraîné un blocage sur l'absorption des nutriments par les racines d'où l'apparition des signes de carence sur les laitues (Welleman K., 2008). Les laitues de la solution témoin à base d'engrais soluble n'ont pas aussi abouti leur développement. Cela est certainement lié au changement brusque de l'EC (SA-2 a doublé à 1000 µS/cm) lors du renouvellement de la moitié de la solution nutritive et de l'indisponibilité des nutriments à cause du pH élevé.

Dans tous les essais réalisés, la vitesse de croissance des laitues cultivées sur le thé de compost est supérieure à celle des laitues produites sur la solution nutritive SA à base d'engrais soluble. Gimenez et al. (2020) ont trouvé une amélioration de la vitesse de croissance des laitues grâce à l'ajout du thé de compost dans une solution nutritive chimique. L'auteur explique que cela est lié à la présence de phyto-hormones et d'acide humique dans le compost.

Nos résultats montrent également que la combinaison du compost avec les fientes de poules a permis d'obtenir un rendement en laitues plus élevé que celui fourni par le compost seul. Plusieurs études témoignent déjà l'avantage de rajout des fientes de poules qui sont plus riches en azote dans le thé. Tikasz *et al.* (2019) ont trouvé qu'un thé à base de fiente de dinde utilisé sur une culture hydroponique de laitues, a produit une quantité de biomasse sèche plus élevée que celle de la culture hydroponique conventionnelle. En effet, la richesse en azote du thé est doublement avantageuse pour la nutrition de la plante et le maintien du développement des microorganismes qui assurent la minéralisation permettant de libérer constamment des éléments nutritifs assimilables par la plante.

V.5. Rentabilité économique de la production bioponique

Nos expérimentations montrent que la culture bioponique de laitues à base de compost n'est pas plus rentable que celle de la production sur terre. Cela est lié à la grande quantité de compost utilisée pour produire la solution nutritive dont 29 kg/m² comparée à 4kg de fumier/m² pour la culture conventionnelle sur sol. Toutefois, si la qualité sanitaire des laitues produites en bioponie est considérée, leur valeur marchande sera supérieure à celle des laitues produites sur terre d'où la culture bioponique à base de compost serait la plus rentable. Il a été constaté que l'ajout des fientes de poules dans le thé de compost a permis d'obtenir une meilleure croissance des laitues et un rendement plus élevé (3,24 kg/m² par rapport à 2,16 kg/m² pour le thé de compost seule), mais ce rendement reste inférieur à celui obtenu en culture sur terre utilisant des engrains chimiques (4kg/m²). Cependant, l'utilisation des fientes de poules en bioponie a donné un gain économique plus élevé que celui de la culture sur terre car ces fientes sont 10 fois moins chères que les engrains chimiques utilisés par les maraîchers. Ce résultat prouve que la culture bioponique s'avère intéressante pour substituer le mode de production conventionnel sur terre.

4. Conclusion

Bien que la culture en bioponie est plus compliquée à gérer avec les nombreuses interactions entre le pH, l'EC et la minéralisation de la matière organique, la réalisation de cette étude témoigne de la faisabilité technique d'utilisation du compost et des fientes de poules pour produire de la solution organique ainsi qu'une conception d'un système low-tech accessible pour les maraîchers de la ville d'Antananarivo. Un premier essai de production de thé de compost oxygéné a démontré que trois jours est déjà suffisant pour infuser le thé. Après avoir testé trois concentrations différentes (10% , 20% et 40% en matière fraîche) pour la préparation de deux types de thé à base de compost de déchets municipaux seule (SB) et un mix avec 25% de fientes de poule (SC), il ressort que le dosage d'infusion optimale est 40% en matière fraîche en ayant préalablement tamisé le compost et les fientes de poules utilisés. Ce dosage permet d'atteindre une EC aux alentours de 1500µS/cm favorable à la culture de laitues. Un premier essai de production de laitues a été effectué pour comparer les thés SB-2 et SC-2 à 20% de concentration en matière fraîche avec une solution témoin SA-2 à base d'engrais soluble de 1g/l. Durant cet essai, le remplacement de la moitié de la solution nutritive au 18^{ème} jour et le non ajustement

du pH ont favorisé l'augmentation de l'EC jusqu'à 4000 µs/cm d'où les plantes ont toutes fanées au bout de 36 jours. Les plantes de la solution témoin SA-2 à base d'engrais soluble ne se sont pas aussi bien développées malgré le renouvellement de la moitié de la solution nutritive au 18^{ème} jour, car le pH non ajusté à 6,5 a limité l'absorption des nutriments. Le bon développement des laitues au cours du deuxième essai de production avec des thés de 40% de concentration en MF comparés avec une solution témoin SA-3 à base d'engrais soluble de 4g/l, marque l'importance du contrôle de pH en bioponie afin de stabiliser l'EC et maximiser l'absorption des nutriments par la plante. Au cours du deuxième essai, le thé SC-3 à base d'un mix de compost et des fientes de poules a obtenu le rendement le plus élevé après 30 jours de culture, avec une moyenne de masse foliaire fraîche $92 \pm 3,90$ g contre $61 \pm 4,36$ g pour SB-3 (thé de compost seul à 40% de MF) et $60 \pm 3,85$ g pour SA-3 (solution nutritive inorganique témoin 4g/l), tout en sachant que le poids marchand de cette variété de laitue locale est minimum 50 g. Pour les deux essais de culture de laitues effectués, la vitesse de croissance des laitues cultivées sur le thé de compost (SB) et le mix avec fientes de poules (SC) est supérieure à celle issue de la solution nutritive inorganique SA, probablement expliquée par la présence de phyto-hormone dans la matière organique des thés. Les résultats d'enquête de six maraîchers a permis de déduire que le rendement de laitues le plus élevé obtenu par l'utilisation du thé de compost combiné aux fientes de poules, sur le système RAFT avec substrat mâchefer, ne dépasse pas encore celui de la culture sur terre. Toutefois, la culture bioponique avec le thé mix compost et fientes de poules est économiquement plus rentable compte tenu de ses charges de production moins élevées qu'une culture en pleine terre. De plus, si la qualité sanitaire des laitues bioponiques ainsi que les avantages offerts par l'économie circulaire du compost seront pris en compte, la valeur marchande de ces laitues sera automatiquement supérieure à celles cultivées sur terre dans les conditions de pollution urbaine. Ainsi face à l'urbanisation de la ville d'Antananarivo et ses impacts négatifs sur les terres agricoles, la substitution du mode de culture conventionnel des laitues en bioponie est faisable tout en utilisant des intrants biologiques comme le compost et les fientes de poules.

Certes la promotion du système de culture bioponique au niveau des maraîchers de la ville d'Antananarivo nécessite encore une amélioration des points suivants :

- Analyse de la qualité agronomique des engrains minéraux, du compost et des fientes de poules par une technique de précision en laboratoire afin de déterminer leurs teneurs exacte en nutriment et proposer un meilleur dosage d'infusion. En effet, le test rapide colorimétrique JBL utilisé dans cette étude n'a pas fourni les valeurs exactes des concentrations en nutriment.
- Amélioration de la minéralisation du thé par un lancement d'une phase de cyclage à vide, en amont de la transplantation des plantes, permettant d'installer les bactéries bénéfiques au cycle de l'azote dans l'eau.
- Renforcement du système d'agitation de l'eau dans le bac de culture pour éviter l'accumulation des fines particules au fond du bac.

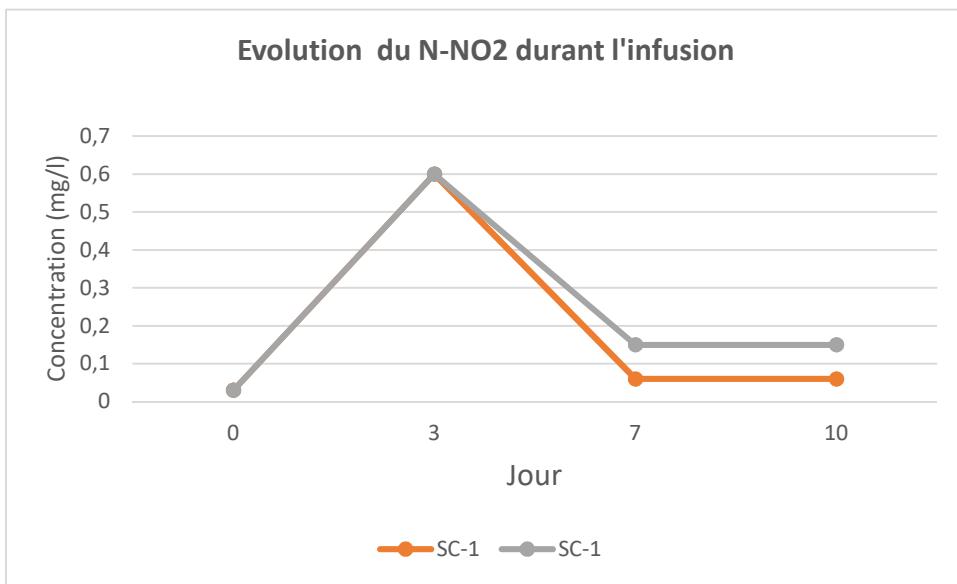
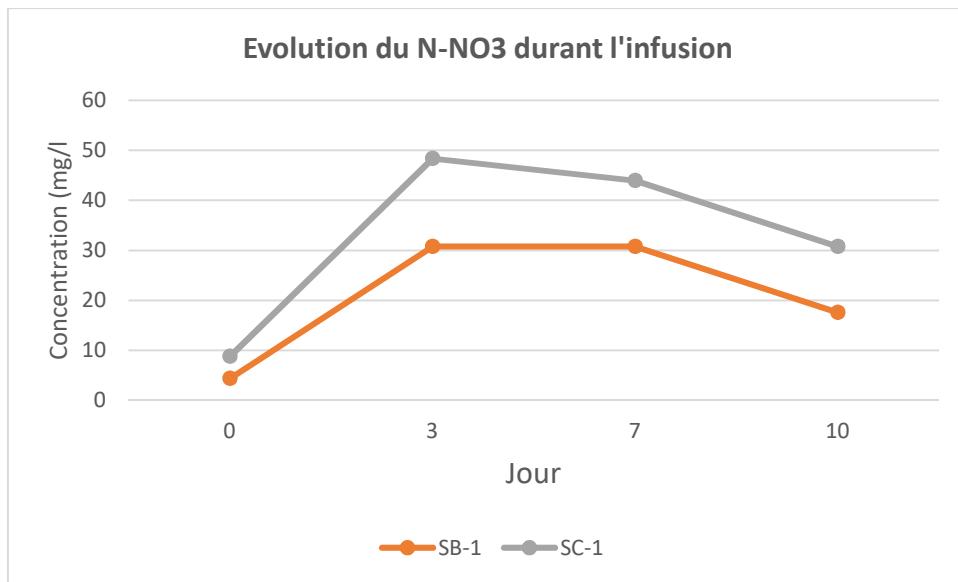
- Réalisation des essais de production de thé d'un mix de compost et des fientes de poules selon différents ratio de mélange afin de déterminer le ratio optimal.
- Test d'un autre système hydroponique (NFT, ebb and flow ou drip system) associé avec un réservoir biofiltre pour favoriser la conversion de l'ammoniac en nitrate par les bactéries transformateurs dans le biofiltre. Dans cette configuration, le thé de compost du réservoir principal passe d'abord dans un biofiltre avant de continuer son trajet dans le système végétal.
- Validation de la performance agronomique du thé produit sur d'autres types de légume feuille locale.
- Recherche d'une solution acide à base de produits biologiques accessibles localement pour la rectification du pH (tels que le jus de citron) ou proposition d'une gestion du pH naturel en ajoutant par exemple de l'ammonium (ce qui fait diminuer le pH).
- Etude de recyclage du thé déjà utilisé (en fin de culture) pour une nouvelle production.
- Analyse microbiologique des laitues produites.
- Conception d'un moyen de stérilisation des fientes pour minimiser le risque de transfert d'agents pathogènes à la culture.
- Test de la culture bioponique avec des maraîchers pour évaluer effectivement si la méthode leur convient et leur est facile à mettre en place.

ANNEXES

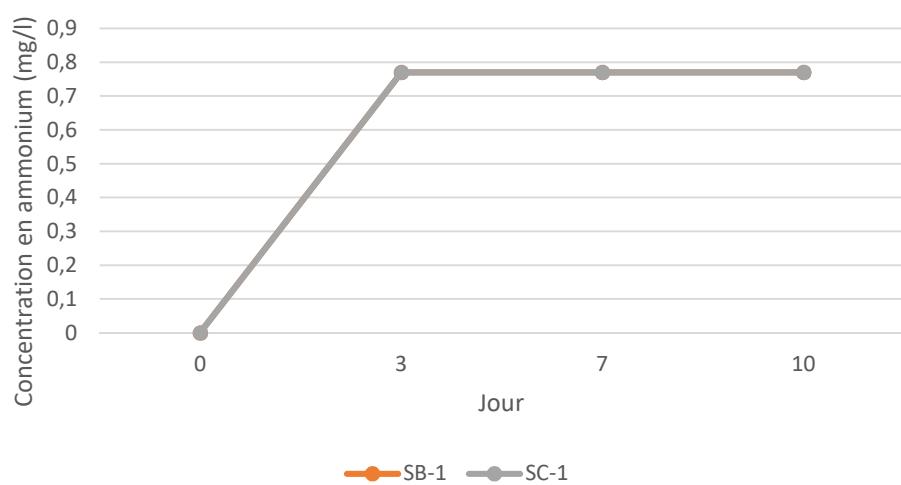
Annexe.1. Seuil de détection du test colorimétrique JBL (ppm)

	NH_4	NO_3	NO_2	PO_4	K^+
Maximum	5	220	1	1,8	14
Minimum	0,05	0,5	0,01	0,02	2

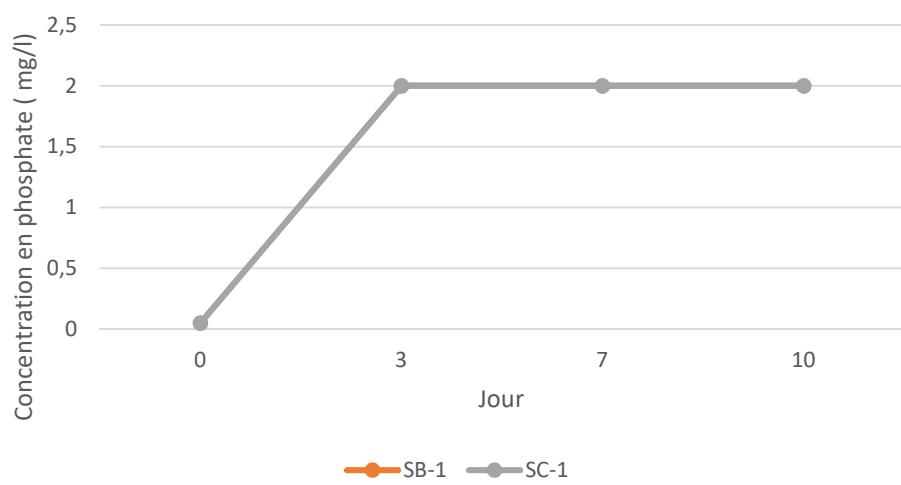
Annexe.2. Evolution des nutriments lors du premier essai de production de thé



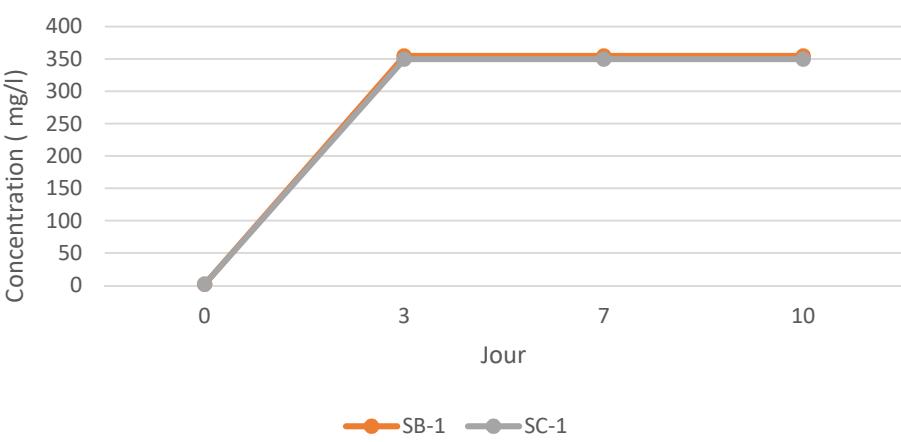
Evolution du N-NH4 durant l'infusion



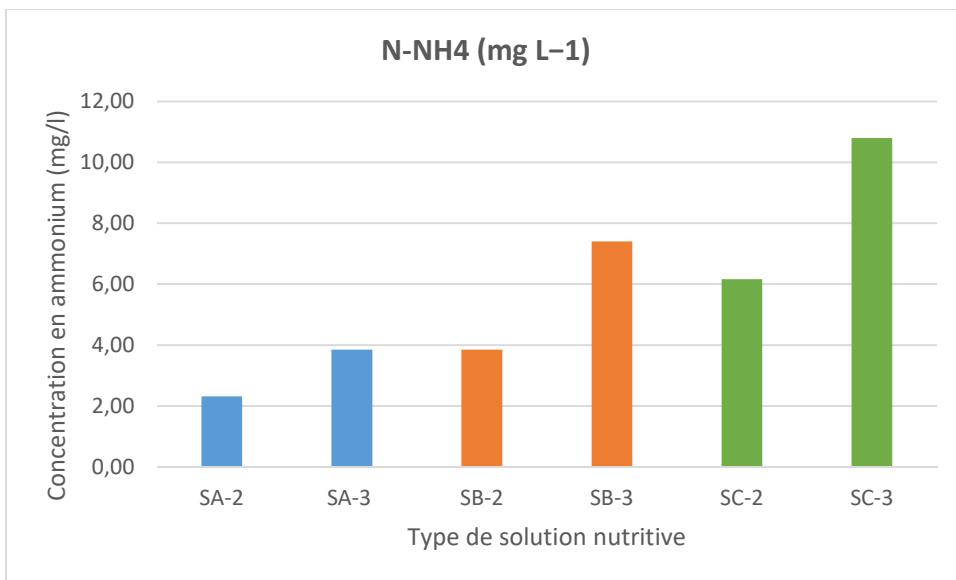
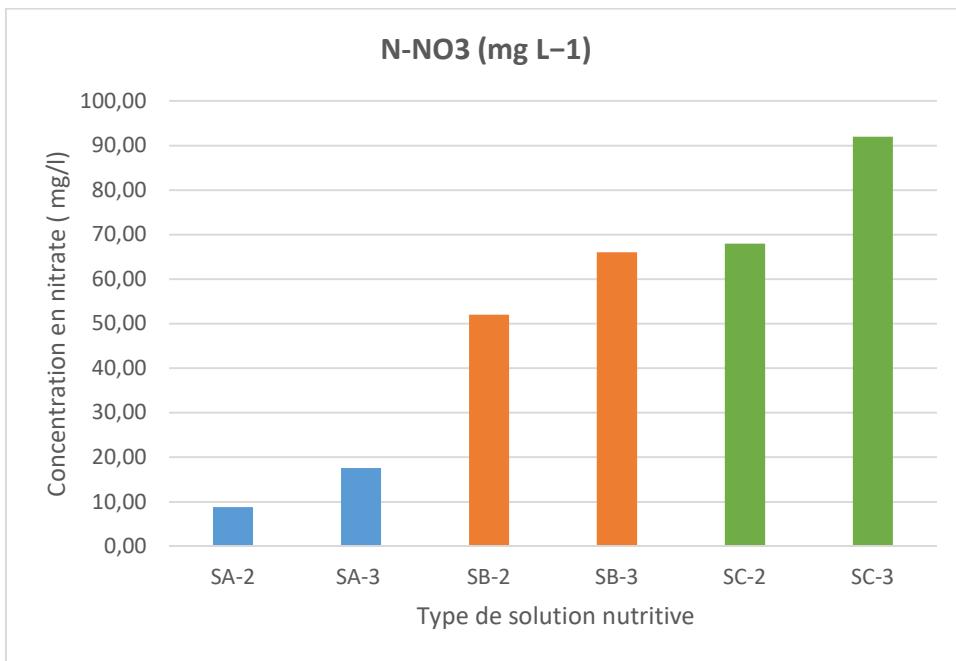
Evolution du phosphate durant l'infusion

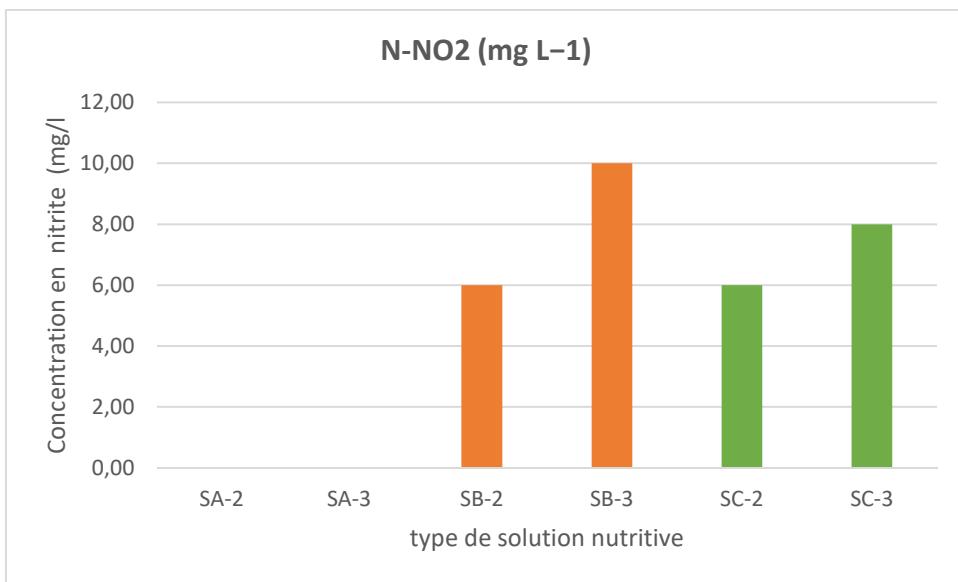


Evolution du potassium durant l'infusion

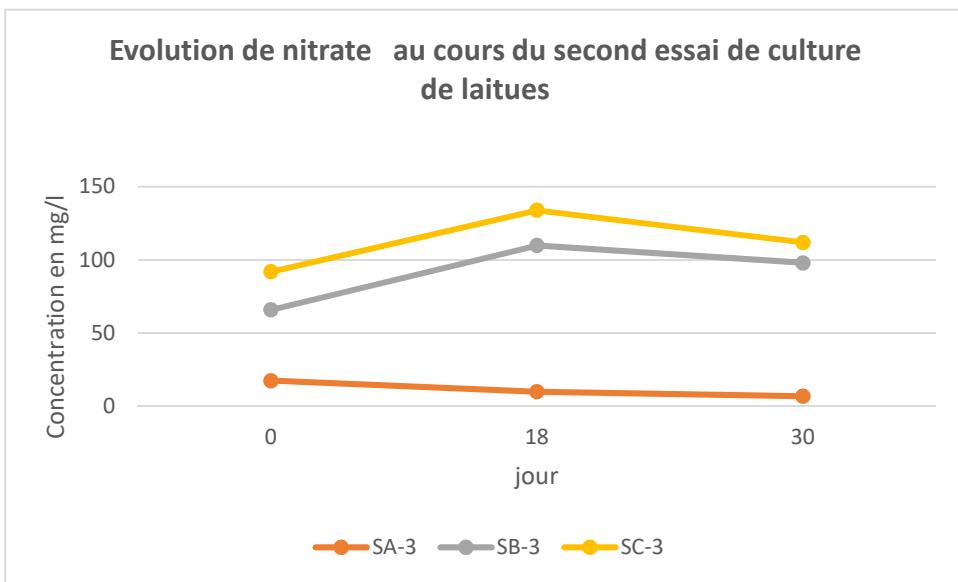
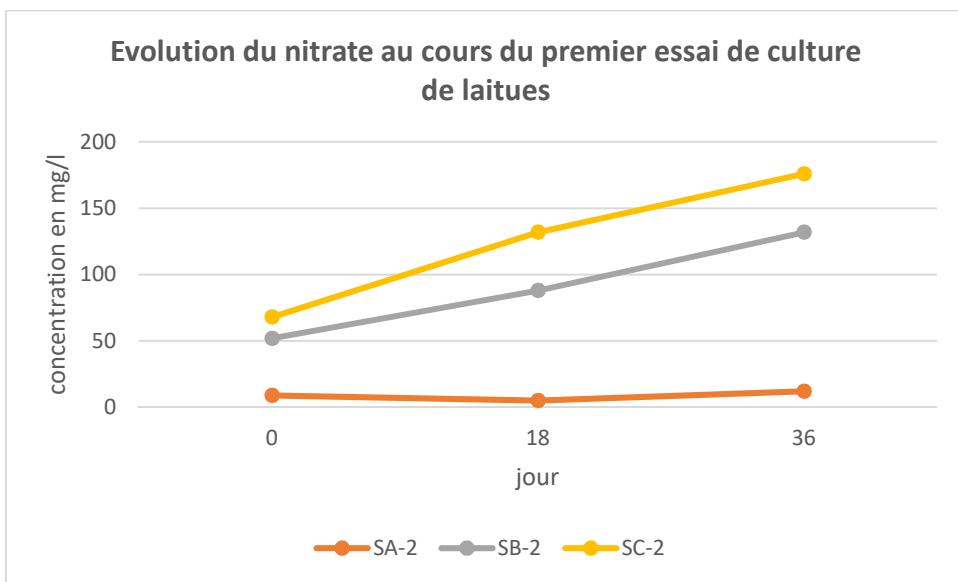


Annexe.3. Caractéristiques des thés SB-2 et SC-2 produits lors du deuxième et troisième essais





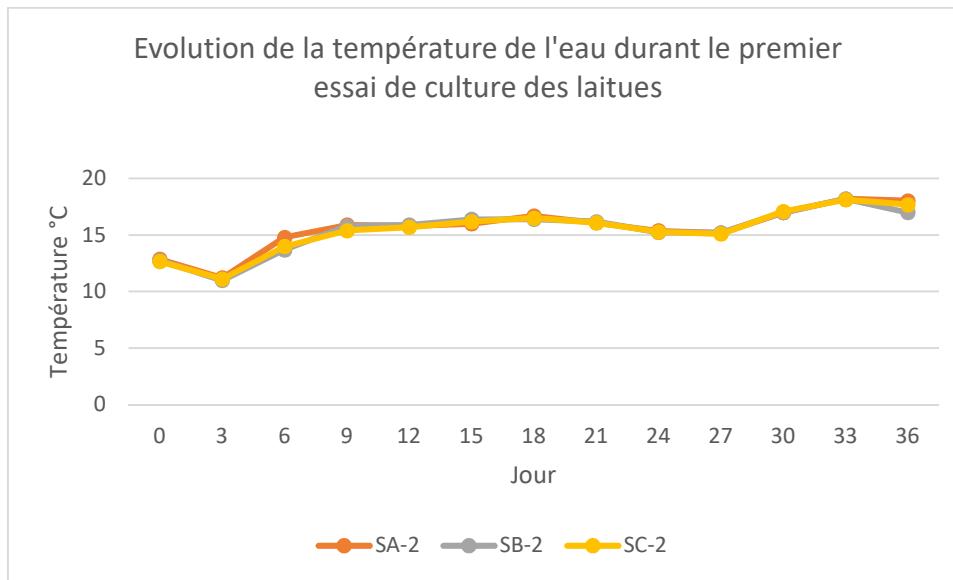
Annexe.4. Evolution du teneur en azote durant la phase de culture des laitues



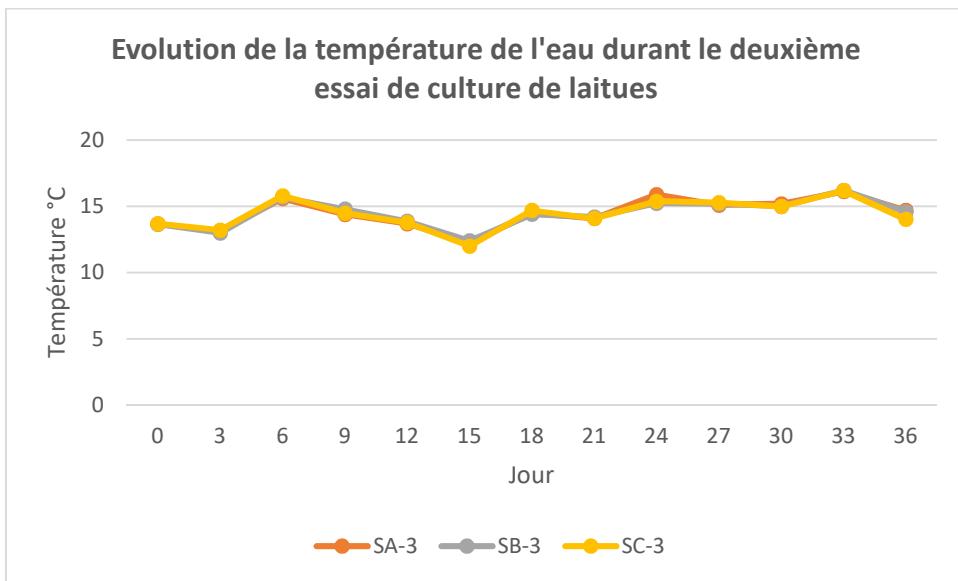
Annexe.5. Valeurs d'ecart-type pour les courbes d'évolution de l'EC pendant le premier et deuxième essai de culture de laitues

Jour	SA-2	SB-2	SC-2	SA-3	SB-3	SC-3
0	4,00	4,16	4,04	4,20	4,56	4,44
3	6,11	4,04	4,04	6,21	4,14	4,24
6	2,52	5,29	4,51	2,72	5,49	4,71
9	6,24	4,04	3,21	6,74	4,54	3,41
12	5,13	2,08	6,43	5,03	1,98	6,63
15	3,21	16,29	4,58	3,41	1,97	4,78
18	3,61	2,65	4,04	3,90	2,85	4,24
21	5,13	2,08	6,24	5,33	2,28	6,44
24	9,00	6,00	2,65	9,20	6,20	2,85
27	3,61	3,21	4,04	3,89	3,41	4,29
30	4,16	4,04	4,04	4,36	4,24	4,24
33	3,21	7,51	10,41	5,21	7,71	12,41
36	7,37	9,29	5,00	13,37	2,29	8,00

Annexe.6. Evolution de la moyenne des températures de l'eau durant la première phase de culture des laitues

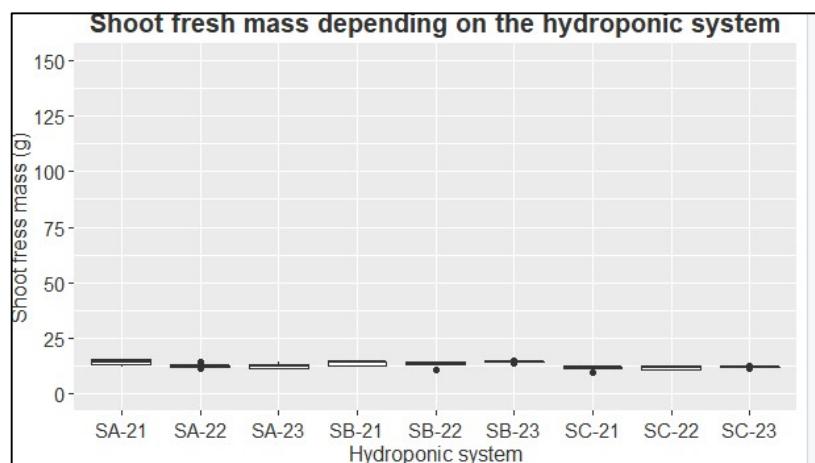


Annexe.7. Evolution de la moyenne des températures de l'eau durant la deuxième phase de culture des laitues

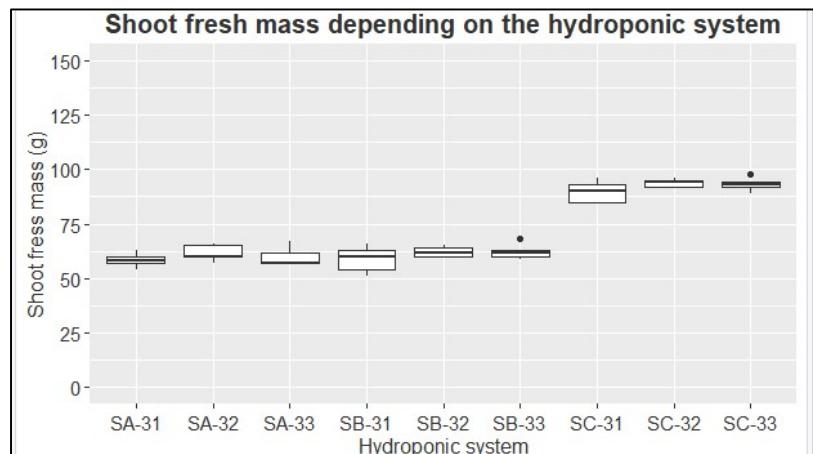


Annexe.8. Résultats du test de Tukey sur la masse foliaire fraîche du premier et deuxième essai de culture de laitue

contrast	p.value
(SA-2) - (SB-2)	0,9744
(SA-2) - (SC-2)	0,0053
(SB-2) - (SC-2)	0,0065



contrast	p.value
(SA-3) - (SB-3)	0.7726
(SA-3) - (SC-3)	<.0001
(SB-3) - (SC-3)	<.0001



BIBLIOGRAPHIE

- ADEME , 2020. Qualité et devenir des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux.
- Alain V., 2003.Fondements & principes du hors-sol : Doc V 3.1 HRS 12 Ind. 10P
- Arancon N.Q., Pant A., Radovich T., Hue N.V., Potter J. K., Converse C.E., 2012. Seed Germination and Seedling Growth of Tomato and Lettuce as Affected by Vermicompost Water Extracts (Teas). HortScience, 47 (12), 1722–1728
- Aubry C., Dabat M.H., Ramanamidonana J.Y., 2014. Fonctions alimentaires de l'agriculture urbaine dans un pays du sud : le cas d'Antananarivo
- Aubry C., Ramamonjisoa J., Dabat M. H., Rakotoarioa J., Rakotondraibe J., Rabeharioa L., 2020. L'agriculture à Antananarivo (Madagascar) : une approche interdisciplinaire. Natures Sciences Sociétés, EDP Sciences, 2008, 16 (1), pp.23-35.
- Banas D. et Lata J.C., 2009. Les nitrates. Université Paris-Sud ; Laboratoire d'Ecologie, Systématique et Evolution
- Barbosa G.L., Gadelha F.D.A., Kublik N., Proctor A., Reichelm L., Weissinger E., Wohlleb G.M. et Halden R.U. , 2015. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12:6879-6891
- Barrett G.E.; Alexander P.D.; Robinson J.S.; Bragg N.C, 2016. Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems—A review. Sci. Hortic., 220–234
- Basosi R.; Spinelli D.; Fierro A.; Jez S., 2014. Mineral Nitrogen Fertilizers: Environmental Impact of Production and Use. pp 1–43
- Beibel J. P., 1960. Hydroponics-The Science of Growing Crops Without Soil. Florida Department of Agric. Bull, 180.
- Bernhard A., 2010. The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impact | Learn Science at Scitable. *Nat. Educ.*
- Blevins D.G., A.J. Hiatt, R.H Lowe et J.E. Leggett, 1978. Influence of K on the uptake, translocation and reduction of nitrate by barley seedlings. Agronomy Journal. 70
- Botheju D., Svalheim O., Bakke R., 2010. Digestate nitrification for nutrient recovery. Open Waste Manag. J.
- Bugbee B., 2003. Nutrient Management in Recirculating Hydroponic Culture
- Cáceres R., Magrí A. et Marfà O., 2015. Nitrification of leachates from manure composting under field conditions and their use in horticulture. Waste Manag. 44, 72–81
- Calvet R.; Chenu C.; Houot S., 2015. Les Matières Organiques Des Sols: Rôles Agronomiques et Environnementaux, 2nd ed.; France Agricole

- Carmassi C., Incrocci L., Malorgio M., Tognoni F., et Pardossi A., 2003. A simple model for salt accumulation in closed-loop hydroponics.
- Cometti N.N.; Bremenkamp D.M.; Galon K.; Hell L.R.; Zanotelli M.F., 2013. Cooling and concentration of nutrient solution in hydroponic lettuce crop. *Horticultura Brasileira* 31: 287-292
- Dabat M. H., Andrianarisoa B., Aubry C., Trèche S., Ramanamidonana J.Y. et Dubbeling M. , 2012. Le cresson à Antananarivo (Madagascar): entre intérêts alimentaires et risques. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 62, 51-64
- Defrise L., Burnod P., Tonneau J.P. , Andriamanga V., 2019. Disparition et permanence de l'agriculture urbaine à Antananarivo. *L'Espace géographique Tome 48* | pages 263 à 281
- Defrise L., 2020. Terres agricoles face à la ville : logiques et pratiques des agriculteurs dans le maintien des espaces agricoles à Antananarivo, Madagascar. Thèse de doctorat : Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement , AgroParisTech
- Dumitrescu V.A., 2013. Comparative analysis of biogas slurry and urine as sustainable nutrient sources for hydroponic vertical farming
- FAO, 2013. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for mediterranean climate areas. FAO plant production and protection paper 2017. Disponible sur <http://www.fao.org/3/a-i3284e.pdf>
- Fardeau J.C., Conesa A.P., 1994. Le phosphore. Dans: Bonneau et Souchier, Pédologie vol 2. Constituants et propriétés du sol. Masson. 557 – 568.
- Fisher P., J. Huang, M. Paz et R. Dickson, 2016. "Having Success with Organic Growing Mixes." Grower Talks, 68-72.
- Franz E., A.V. Semenov, A.H.C. Van Bruggen, 2008. Modelling the contamination of lettuce with Escherichia coli O157:H7 from manure-amended soil and the effect of intervention strategies. *J. Appl. Microbiol.*, 105 , pp. 1569-1584
- Genot V., Colinet G., Brahy V, Bock L. , 2007. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ* , 13(1), 121-138
- Giménez A.; Fernández J. A.; Pascual J. A.; Ros M.; Egea-Gilabert C., 2020 . Application of Directly Brewed Compost Extract Improves Yield and Quality in Baby Leaf Lettuce Grown Hydroponically. *Agronomy*, 10 (3), 370.
- Gonnella M.; Renna M., 2020. The Evolution of Soilless Systems towards Ecological Sustainability in the Perspective of a Circular Economy. Is It Really the Opposite of Organic Agriculture? *Agronomy*, 11 (5), 950.
- Goyal S.S., Huffaker R.C. , 1984. Nitrogen toxicity in plants. *Nitrogen in crop production* 97–118
- Grady J., LIM H.C., 1980. Biological Wastewater Treatment: Theory and Applications. Marcel Dekker, Incorporated

- Graeme A. Sandral, Ehsan Tavakkoli, Roger Armstrong, Maryam Barati, Russell Pumpa, David Lester, Sean Mason, Rob Norton, Mike Bell , 2019. Phosphorus and phosphorus stratification. Grains Research and Development Corporation , 203-212.
- Green B. W., 2015. Fertilizers in Aquaculture. Feed Feed. Pract. Aquac., 27–52
- Gruda N. et Schnitzler W.H. 2006. Wood fiber substrates as a peat alternative for vegetable production. Eur. J. Wood Prod., 64: 347–350.
- HACH, 2022. Comment puis-je convertir les mesures du NH4 (ammonium) en NH3 (ammoniac) ? Disponible sur https://frsupport.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1026665/~comment-puis-je-convertirles-mesures-du-nh4-%28ammonium%29-en-nh3-%28ammoniac%29-%3F-, (29/08/2022).
- Hatfield J.L, 2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. J Agron 103:351-370
- Hatfield J.L., Preuger J.H. , 2015. Temperature extremes: effect on plant growth and development. Weather and climate extremes 10:4-10
- Hoque M.M., Ajwa H.A., Smith R. , 2007. Nitrite and ammonium toxicity on lettuce grown under hydroponics. Commun Soil Sci Plant Anal 39:207–216.
- Huang H. K. et Tseng S. K. , 2001. Nitrate reduction by *Citrobacter* diversus under aerobic environment. Applied Microbiology and Biotechnology.
- Hughes A.J , 2017. Hydroponic Growing Offers Advantages, but won't replace the soil.
- Hussain A., Iqbal K., Aziem S.,Mahato P., Negi A.K., 2014. A Review On The Science Of Growing Crops WithoutSoil (Soilless Culture)– ANovel Alternative For Growing Crops. Inter. Jour. of Agri. and Crop Scie. 7(11): 833-842.
- Ingham E., 2005. The Compost Tea Brewing Manual (5th edn). Soil Foodweb Incorporated Corvallis
- Jensen M.H., H.M. Lisa, et M. Fontes, 1973. The pride of Abu Dhabi. American Vegetable Grower Nov. 1973, 21(11): 35, 68, 70.
- Kumar S., Singh M., Yadav K., Singh P. , 2021. Opportunities and constraints in hydroponic crop production systems : A review. Environment Conservation Journal , 401-408
- Lachapelle J., 2010. Réévaluation des besoins en azote , phosphore et potassium des cultures de brocoli , de chou et de chou-fleur en sols minéraux au Québec
- Leikam D. F., L. S. Murphy, D. E. Kissel, D. A. Whitney et H. C. Mserch, 1983. Effect of nitrogen and phosphorus chorus application and nitrogen source in winter wheat grand yield and leaf tissue phosphorus. Soil Science: 530-535.
- Lennard W., 2012. Aquaponic System Design Parameters: Basic System Water Chemistry

- Lenni , Suhardiyanto H, Seminar K.B. , Setiawan R. P. A., 2019. Photosynthetic Rate of Lettuce Cultivated on Floating Raft Hydroponic with Controlled Nutrient Solution. Journal of Biosciences Vol. 27 No. 1
- Leudtke B, 2010. Use of Compost Tea as a Nutrient Amendment for Plant Growth in a ReCirculating Hydroponic System
- Lind O.P., Hultberg M. , Bergstrand K. J., Larsson-Jönsson H. , Caspersen S., Asp H., 2020. Biogas Digestate in Vegetable Hydroponic Production: pH Dynamics and pH Management by Controlled Nitrification. Waste and Biomass Valorization, Department of Biosystems and Technology, Swedish
- Marschner H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press, London. 889 p
- Mattson N., 2013. Ammonium Toxicity: Avoid Getting Burned This Winter. GrowerTalks Vol. 77(10):36
- Mérigout P., 2006. Étude du métabolisme de la plante en réponse à l'apport de différents fertilisants et adjuvants culturaux. Influence des phytohormones sur le métabolisme azoté.. Sciences of the Universe. INAPG (AgroParisTech)
- Nelson P.V., 2011. Greenhouse operation and management. Prentice Hall, North Carolina
- Niam, 2017. Simulation of temperature distribution on the planting hole of floating hydroponic for shallot production in tropical lowland. Jurnal Keteknikan Pertanian 5:235-244.
- Nguyen N.T., McInturf S.A., Mendoza-Cózatl D.G, 2016. Hydroponics: A versatile system to study nutrient allocation and plant responses to nutrient availability and exposure to toxic elements. Journal of Visualized Experiments, 10: 3791-54317.
- Okemwa E., 2015. Effectiveness of aquaponic and hydroponic gardening to traditional gardening. International Journal of Scientific Research and Innovative Technology, 2:2313-3759.
- ONU (Nations Unies, Département des affaires économiques et sociales, Division de la population). 2018. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. Disponible sur <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications>
- Prajapati K. et Modi et H.A, 2012 . The importance of potassium in plant growth – a review. Indian Journal of Plant Sciences Vol. 1(02-03) pp.177-186.
- Promix , 2020. Comment maintenir le pH d'un substrat ?
Disponible sur <https://www.pthorticulture.com/media/3462/comment-maintenir-le-ph-d-un-substrat.pdf> , 07/09/2022
- Radin Andrew M .et Warman Philip R., 2011. Effect of Municipal Solid Waste Compost and Compost Tea as Fertility Amendments on Growth and Tissue Element Concentration in Container-Grown Tomato, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 42:11, 1349-1362

- Radhakrishnan.G , Upadhyay T.K., Singh P. , Sharma S. K., 2019. Impact of hydroponics: present and future perspective for farmer's welfare. International Journal of Environment, Science and Technology Volume 5, pp. 19-26
- Raviv M., Tarre S., Geler Z., Shelef, 1987. Changes in some physical and chemical properties of fibrous solids from cow manure and digested cow manure during composting. Biological Wastes 19, 309–318.
- Raviv M., Krasnovsky A., Medina S., et Reuveni R, 1998. Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 73(4), 485-49
- Resh H.M., 1978. Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook Of Soilless Food Growing Methods, Woodbridge Press Publishing Company, Santa Barbara, 287.
- Salas M. C.; Verdejo M. M.; Sánchez A.; Guzmán M.; Valenzuela J. L.; Montero J. L, 2012. Vertical Gardening. Adaptation of Hydroponic Systems and Ornamental Species. Acta Hortic. 937, 1153–1160.
- Sardare M. D., et Admane S. V, 2013. A review on plant without soil-hydroponics. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2(3), 299-304.
- Sarlé M, 2020. Monter sa microferme en hydroponie, bioponie et aquaponie ; Guide pratique et récit illustré pour un projet d'installation durable
- Savvas D. 2003. Hydroponics: A modern technology supporting the application of integrated crop management in greenhouse. Food, Agriculture and Environment, 1:80-86.
- Savvas D., Passam H., Olympios C., Nasi E., Moustaka E., Mantzos N., Barouchas P., 2006. Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. HortScience 41:1667–1673
- Savvas D. et Gruda N., 2018. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry—A review. Eur. J. Hortic. Sci. 83, 280–293
- Shaji H.; Chandran V.; Mathew L. , 2021. Organic Fertilizers as a Route to Controlled Release of Nutrients. In Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture; Lewu, F. B., Volova, T., Thomas, S., Rakhimol, K. R., Eds.; Academic Press; pp 231–245
- Scheiner J.D., 2005. « Spéciation du Carbone, de l'Azote et du Phosphore de différentes boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, 210p.
- Scheuerell S., et Mahaffee W., 2002. Compost tea: principles and prospects for plant disease control. Compost science & utilization, 10(4), 313-338
- Shubha K.; Mukherjee A.; Dubey A.; Koley T. K, 2019. Bioponics-A New Way to Grow Soilles Vegetable Cultivation. Agric. Food, 1 (12)

- Singh S., et Singh B. S., 2012. Hydroponics–A technique for cultivation of vegetables and medicinal plants]. In Proceedings of 4th Global conference on Horticulture for Food, Nutrition and Livelihood Options. Bhubaneshwar, Odisha, India p. 220
- Supattra Charoenpakdee, 2014. Using animal manure to grow lettuce (*Lactuca sativa L.*) in a Homemade Hydroponics System. *KKU Res. J.* 19 (Supplement Issue): 256-261
- Takemura K., Endo R., Shibuya T., Kitaya Y. , 2016. Modifications of concentrations of plant macronutrient ions in digestate from anaerobic digestion during nitrification processes. *J. Residuals Sci. Technol.* 13, 207–214
- Texier W., 2013. L'hydroponie pour tous. *Hydroscope*. Éditions MAMA EDITIONS, 285p
- Tikasz P.; MacPherson S.; Adamchuk V.; Lefsrud M., 2019. Aerated Chicken, Cow, and Turkey Manure Extracts Differentially Affect Lettuce and Kale Yield in Hydroponics. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, 8 (3), 241–252.
- Tikasz P, 2019. Development of a manure-based nutrient supply for hydroponic crop production using ion activity monitoring. Thèse de doctorat : McGill University, Montreal, Canada
- Tremblay N., Scharpf H.-C., Weier U., Laurence H. et Owen J., 2004. Régie de l'azote chez les cultures maraîchères: guide pour une fertilisation raisonnée
- Tyson R. V., Simonne E. H., Davis M., Lamb E. M., White J. M., et Treadwell D. D, 2007. Effect of nutrient solution, nitrate-nitrogen concentration, and pH on nitrification rate in perlite medium. *Journal of Plant Nutrition*, 30(6), 901-913.
- Welleman K., 2008. Systems for fertilizer dilution and ways to diversity of water drop drippers and ways to distribute solutions across a greenhouse. 6th Curso Y Congreso Internacional de Hidroponia en Mexico, Toluca, Mexico.
- Williams K. A.; Nelson J. S., 2016. Challenges of Using Organic Fertilizers in Hydroponic Production Systems. *Acta Hortic.*, 1112, 365–370
- Zheng Y., L. Wang, et M. Dixon, 2007. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Sci. Hort.* 113:162–165.
- <https://manicbotanix.com/ph-in-hydroponics/> , 11/10/2022
- <https://en.climate-data.org/africa/madagascar/antananarivo/antananarivo-548/> , 02/08/2022
- <https://www.jbl.de/fr/blog/detail/157?country=fr> , 01/10/2022