
Evaluation de l'efficacité du thé de bouse de vache et effluent de biométhanisation sur le développement de la laitue cultivée à Ouanaminthe, Nord-Est, Haïti

Auteur : Cherenfant, Jean-Alfred

Promoteur(s) : 10924

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/2268.2/15475>

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.



**EVALUATION DE L'EFFICACITÉ DU THÉ DE
BOUSE DE VACHE ET EFFLUENT DE
BIOMÉTHANISATION SUR LE
DÉVELOPPEMENT DE LA LAITUE CULTIVÉE
À OUANAMINTHE, NORD 'EST, HAÏTI**

JEAN-ALFRED CHERENFANT

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME EN MASTER
DE SPÉCIALISATION EN PRODUCTION INTÉGRÉE ET PRÉSERVATION DES RESSOURCES
NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET PÉRIURBAIN**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021 – 2022

PROMOTEUR : STÉPHANE COGNET

Copyright : Aux termes de la loi belge du 30 Juin 1994 relative au droit d'auteur, il est formellement interdit de procéder à la reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit sans 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.

**EVALUATION DE L'EFFICACITÉ DU THÉ DE
BOUSE DE VACHE ET EFFLUENT DE
BIOMÉTHANISATION SUR LE
DÉVELOPPEMENT DE LA LAITUE CULTIVÉE
À OUANAMINTHE, NORD 'EST, HAÏTI**

JEAN-ALFRED CHERENFANT

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME EN MASTER
DE SPÉCIALISATION EN PRODUCTION INTÉGRÉE ET PRÉSERVATION DES RESSOURCES
NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET PÉRIURBAIN**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021 – 2022

PROMOTEUR : STÉPHANE COGNET

REMERCIEMENTS

A Dieu tout puissant, créateur de l'univers, en qui, j'ai mis tout mon espoir.

Je ne cesserai jamais de remercier l'Académie de Recherche de l'Enseignement Supérieur Belge (ARES) de m'avoir permis de découvrir un nouvel horizon, de connaître d'autres personnes et de réaliser cette étude avancée dans ma vie professionnelle.

Ma gratitude se dirige vers l'Université de Liège spécialement le corps professoral du Master PPRN de la Faculté d'Agronomie Gembloux Agro Biotech et la Haute Ecole de Charlemagne qui ont contribué à ma formation professionnelle et pour leurs dévouements.

Mes sincères remerciements s'adressent à mon Promoteur Stéphane COGNET pour son appréciation de mon sujet de recherche et pour son immense collaboration, ses critiques constructives qui m'ont permis de réussir ce travail.

J'envoie mes remerciements au professeur Jeroen Meersman pour le temps qu'il a disposé pour vérifier les résultats de mon travail.

J'adresse ma très chère gratitude au coordonnateur du Master PPRN, le Professeur Haïssam JIJAKLI, pour les efforts consentis pour la bonne marche de cette formation.

Je tiens à remercier toute l'équipe du Centre de Recherche d'Etude et de Formation, (CREF), de Kiskeya Vèt, Haïti Biogaz, pour leur collaboration au cours du stage à Ouanaminthe.

Un remerciement très spécial à mon ami Claudy qui m'a orienté pendant toute la période de l'étude.

Un grand remerciement au doctorant Félicien pour ses conseils et les échanges fructueux lors du traitement des données et pour la relecture du document.

Un merci à toute la promotion du Master PPRN 2021-2022 : spécialement Amétel, Pierre, Roselande et Nixon pour leur solidarité et leur support.

A ma très chère épouse Renite, et mes deux précieux enfants Hants-Djerry et Hannah-Laurie pour leur grand amour.

A mon père CHERENFANT Mercilien et ma mère CESAIRE Françoise et mes sœurs CESAIRE Guerdie, CHERENFANT Ange-Carline, Rose-Carline, Ange-Flore, Phara, Sabie, Samantha.

RÉSUMÉ

Cet essai a été réalisé sur la ferme expérimentale de l'ONG locale CREF (Centre de Recherche d'Etude et de Formation) à Ouanaminthe, en vue d'évaluer l'efficacité de deux fertilisants organiques liquides sur la croissance et le rendement de la laitue, variété feuille de chêne (*Lactuca sativa var. crispa*) cultivée en plein champ. Cette étude a été menée à l'aide de quatre traitements : un engrais chimique (FC), un effluent de biométhanisation (FB), un thé de bouse de vache (FT) et un témoin (T) non fertilisé. Les quatre traitements ont été distribués selon un dispositif en bloc complètement aléatoire établi sur une parcelle. Les analyses des paramètres physico-chimiques des échantillons de sol (1500 g) et des deux fertilisants (500 ml) ont été prélevés et analysés au laboratoire de JAD en République Dominicaine. Les données collectées sur la survie, la hauteur, le diamètre de la couronne des feuilles, le poids moyen, la biomasse totale et le rendement ont été soumises à des analyses de variance. En cas de différence significative constatée, une comparaison multiple des moyennes a été réalisée selon le test de Tukey au seuil de probabilité de 5% ($p < 0,05$).

Les résultats ont montré que la concentration en NPK a été plus élevée chez le FB (0,15 % m/m ; 0,27 % et 0,09 %) comparé au FT (0,07 % ; 0,07% et 0,04%). Les résidus des deux fertilisants liquides (0,74 L et 1,58 L) ont été dilués dans l'eau, à 10 %, respectivement. Pour le taux de survie, aucune différence n'a été observée entre les traitements. L'engrais chimique (FC) et l'effluent de biométhanisation (FB) ont considérablement amélioré la croissance et le rendement de la laitue, pourtant les traitements de thé de bouse de vache (FT) et le témoin (T) ont montré une croissance et des rendements faibles. Le rendement moyen des laitues traitées avec l'engrais chimique FC (0,51 kg/ m²) a été légèrement supérieur à celui de l'effluent biométhanisé FB (0,48 kg/ m²), mais 2 fois supérieur à celui du thé de bouse de vache FT (0,24 kg/m²) et celui du témoin T (0,23 kg/ m²). Enfin, dans le cadre de cet essai, les résultats ont montré la potentialité de l'effluent de biométhanisation comme fertilisant organique liquide. Ses influences sur la croissance et le rendement de la laitue cultivée en plein champ ont été significatives. Cette étude a permis de mettre en évidence le potentiel que représente le processus de biométhanisation dans la valorisation des déchets organiques fermentescibles. Toutefois il serait intéressant de pousser d'avantages les recherches sur le processus de production des fertilisants organiques liquides par digestion anaérobie et d'évaluer l'efficacité des produits avec d'autres cultures en serre ou en plein champ.

Mots-clés : Fertilisant organique liquide, efficacité, effluent, biométhanisation, *Lactuca sativa crispa*, déchets fermentescibles, Ouanaminthe.

ABSTRACT

This trial was carried out on the experimental farm of the local NGO CREF (Centre de Recherche d'Etude et de Formation) in Ouanaminthe, with a view to evaluating the effectiveness of two liquid organic fertilizers on the growth and yield of lettuce, variety, oak leaf (*Lactuca sativa* var. Crispa) grown in the field. This study was conducted using four treatments: a chemical fertilizer (FC), an anaerobic digestion effluent (FB), a cow dung tea (FT) and an unfertilized control (T). The four treatments were distributed according to a completely random block device established on a plot. The analyzes of the physico-chemical parameters of the soil samples (1500 g) and of the two fertilizers (500 ml) were taken and analyzed at the JAD laboratory in the Dominican Republic. Data collected on survival, height, leaf crown diameter, mean weight, total biomass and yield were subjected to analyzes of variance. In case of a significant difference, a multiple comparison of means was performed using the Tukey test at the 5% probability level ($p < 0.05$).

The results showed that the rate of (NPK) was higher in FB (0.15%; 0.27% and 0.09%) compared to FT (0.07%; 0.07% and 0.04%). The residues of the two liquid fertilizers (0.74 L and 1.58 L) were diluted in water, at 10%, respectively. For the survival rate, no difference was observed between the treatments. Chemical fertilizer (CF) and biogas effluent (FB) significantly improved lettuce growth and yield, yet cow dung tea (FT) and control (T) treatments showed growth and low yields. The average yield of lettuce treated with FC chemical fertilizer (0.51 kg/m²) was slightly higher than that of the biomethanized effluent FB (0.48 kg/m²), but 2 times higher than that of FT cow dung tea (0.24 kg/m²) and control T (0.23 kg/m²). Finally, within the framework of this test, the results showed the potential of biomethanization effluent as a liquid organic fertilizer. Its influences on the growth and yield of lettuce grown in the field have been significant. This study made it possible to highlight the potential represented by the biomethanization process in the recovery of fermentable organic waste. However, it would be interesting to further research on the production process of liquid organic fertilizers by anaerobic digestion and to evaluate the effectiveness of the products with other crops in greenhouses or in the open field.

Key words: Liquid organic fertilizer, efficiency, biomethanation, *Lactuca sativa* var. Crispa, fermentable waste, Ouanaminthe.

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
RÉSUMÉ.....	ii
ABSTRACT	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	ix
INTRODUCTION.....	10
I. REVUE DE LITTÉRATURE.....	13
1.1. Problématique de la fertilité des sols.....	13
1.2. Fertilité chimique	14
1.3. Fertilité organique	14
1.3.1. Engrais organiques	14
1.3.2. Influence de la matière organique sur les propriétés du sol	15
1.3.3. Application et utilisations des engrais organiques	15
1.4. Engrais organique liquide.....	16
1.4.1. Effluents de Biométhanisation	16
1.4.2. Thé de bouse de vache	20
1.5.1. Règlement « Fertilisant » 2019/10091 de la Wallonie.....	22
1.5.2. Normes ou Règlements des engrais organiques selon AFNOR.....	23
1.6. Cas d'étude réalisés.....	23
1.6.1. Essais réalisés sur l'efficacité de certains effluents organiques.....	25
1.6.2. Travaux réalisés sur la fertilisation de la laitue.....	25
1.7. Culture de laitue	26
1.7.1. Généralité sur la culture de la laitue.....	27
1.7.2. Exigences Eco-physiologiques.....	28
1.7.3. Fertilisation de la laitue	28
1.7.4. Rendement de la laitue	29
II. PHASE EXPÉRIMENTALE	29
2.1. Cadre physique de l'essai.....	30
2.2. MATÉRIELS	32
2.2.1. Matériel végétal utilisé	32
2.2.2. Fertilisants utilisés.....	33

2.2.3. Préparation des fertilisants	33
2.3. Méthodes	35
2.3.1. Dispositif expérimental	35
2.3.2. Conduite de l'essai	36
2.3.3. Analyses des caractéristiques physico-chimiques des effluents	41
2.3.4. Détermination du taux de dilution du thé de bouse de vache et de l'effluent de biométhanisation	41
2.3.5. Évaluation de l'efficacité des fertilisants sur le taux de survie, les paramètres de croissance et de rendement.....	42
2.4. Analyses statistiques	43
III. RESULTATS	44
3.1. Caractéristiques physico-chimiques des fertilisants organiques liquides	44
3.2. Détermination du taux de dilution des biofertilisants	44
3.3. Taux de survie et Paramètres de croissance	45
3.3.1. Taux de survie	45
3.3.2. Paramètres de croissance.....	46
IV. DISCUSSIONS.....	50
V. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	53
VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux 1. Valeurs fertilisantes des lisiers de bovins.....	20
Tableau 2. Valeurs agronomiques des digestats liquides et engrais organiques liquides selon le règlement fertilisants (exprimé en % de matière brute) en wallonie	23
Tableau 3. Caractérisation physico-chimique du sol de l'essai expérimental.....	38
Tableau 4. Teneur en éléments nutritifs du thé bouse de vache et de l'effluent utilisées	44
Tableau 5. Taux de dilution et apport des biofertilisants	44
Tableau 6. Effets des fertilisants sur la survie des plantes de laitue	46
Tableau 7. Effets des fertilisants sur la hauteur des plantes de laitue	46
Tableau 8. Effets des fertilisants sur le diamètre de la laitue (<i>lactuca sativa</i>).....	47
Tableau 9. Effets des fertilisants sur le poids frais, biomasse totale et rendement de la laitue (<i>lactuca sativa</i>).....	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Processus de la biométhanisation	18
Figure 2. Synthèse des effets enregistrées sur les propriétés des sols, d'après des expérimentations de terrain, manesseri et aubry « 16 septembre 2016, space	20
Figure 3. Représentation géographique de ouanaminthe	30
Figure 4. Température et pluviométrie de ouanaminthe	31
Figure 5. Localisation du site de l'étude	32
Figure 6. (a) emballage des laitues ; (b) paquet en gramme ; (c) semences et de laitue	33
Figure 7. (a) préparation du thé de bouse ; fermentation anaérobique ; (c) le thé	34
Figure 8. (a) déchets organiques utilisés ; (b) fermentation anaérobique ; (c) l'effluent	35
Figure 9. Présentation du dispositif expérimental	36
Figure 10. (a) arrosage après semis de la laitue ; (b) plantule de la laitue	37
Figure 11. (a) labourage du terrain ; (b) hersage du terrain	39
Figure 13. (a) binage des plants de laitue ; (b) arrosage des plants de laitue	40
Figure 14. (a) test de ce et du ph de la concentration ; (b) test ce et ph de la solution	42
Figure 15. (a) mesures de hauteur des ; (b) mesures du diamètre des laitues	42
Figure 16. (a) récolte (b) rendement de la laitue	43

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Résultats des analyses de sol	A
annexe 2. Résultats des analyses chimiques des fertilisants organiques.....	B
annexe 3. Images des activités de terrain	D
annexe 4. Anova.....	E
annexe 5. Calcul de dilution.....	K

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFNOR	: Association Française de Normalisation
ANOVA	: Analyse de Variance
ANSES	: Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
BVC	: Bureau Véritas Certification.
CE	: Conductivité Electrique
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CIPCA	: Centro de Capacitacion para el Campesinado
CNSA	: Coordination Nationale de la Sécurité Alimentaire
COMIFER	: Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée
CRE	: Capacité de Rétention en Eau
CREF	: Centre de Recherche d'Etude et de Formation
FAO	: Food Agriculture Organization of the Unions Nations
FONAG	: Fondo para la Proteccion del Agua
IFV	: Institut Français de la Vigne et du Vin
JAD	: Junta Agroempresarial Dominicaca
MAFOR	: Matières Fertilisantes d'Origine Résiduaire.
MARNDR	: ministère de l'Agriculture des Ressources Naturelles et du Développement Rural
NRCS	: Natural Resource Conservation Service of the United States
ONG	: Organisation Non Gouvernementale
PIB	: Produit Intérieur Brut
PNIA	: Plan National d'Investissement Agricole
VADIMETHAN	: Valorisation Agricole de Digestat de Méthanisation
USD	: United State Dollar

INTRODUCTION

Les problèmes de maintien de la fertilité des sols en Haïti entravent l'augmentation des rendements agricoles et limitent les possibilités d'augmenter les revenus des agriculteurs (Jeune, 2020). Cette situation a entraîné une faible production agricole dans tout le pays. Pour confirmer ce phénomène, la CNSA (2016) a déclaré que depuis plus de deux décennies, Haïti fait face à une grave insécurité alimentaire due à la rareté des produits agricoles, et celle-ci augmente chaque jour. Pour le MARNDR (2016), plus de 50% de la population vit en état de malnutrition. Geert van Vliet (2016) ajoute que depuis l'exercice 2011-2012, les importations du pays valent 50 fois la valeur des exportations.

Le manque d'infrastructures et la mauvaise gouvernance semblent limiter les investissements et entraver l'innovation agricole. Dans le même temps, les inégalités sociales existantes ont également considérablement entravé la revitalisation et le développement de l'économie nationale. Lors de la mise en œuvre du PNIA 2010-2016, le secteur agricole a connu une croissance négative (MARNDR, 2016). Selon Benoit-Cattin (2015), cela peut être dû à des conditions agro climatiques défavorables (sécheresses, ouragans) etc. qui affectent la production agricole. Par ailleurs, le secteur agricole fait face à un réel déficit de financement. Le budget public de l'agriculture a longtemps été inférieur à 5 % du budget total.

Au niveau bancaire, les crédits accordés au secteur agricole n'ont en fait jamais dépassé 2% du total des crédits bancaires et se limitent généralement au financement de la récolte ou de la commercialisation plutôt qu'à la production. "L'analyse globale des flux financiers agricoles montre clairement que les agriculteurs, bien que pauvres, sont les principaux bailleurs de fonds du secteur. Par conséquent, le système financier actuel n'est pas adapté aux besoins de développement de l'agriculture haïtienne (Giordano, 2015)." Sous une combinaison de facteurs, y compris les lacunes des politiques publiques sur le pays dans son ensemble, et l'agriculture en particulier, le secteur agricole a la performance la plus faible de la région, avec une productivité des terres de 563 USD/ha (Geert VanVleet, 2016). Compte tenu de la faiblesse de la technologie et de l'innovation dans le secteur agricole, le crédit bancaire est presque totalement absent ; l'agriculture haïtienne n'est pas compétitive. Cependant, selon la Banque mondiale (2019), le secteur agricole joue un rôle important dans l'économie du pays, représentant 18% du PIB.

Deshommes (1998) a mis en évidence d'autres problèmes dans le secteur agricole, tels que : la dégradation des ressources naturelles, la baisse de la fertilité des sols, diverses perturbations

écologiques et la réduction du capital des ménages ruraux, et le manque de technologies de soutien. À l'échelle nationale, le secteur agricole se caractérise par un accès limité aux intrants agricoles, en particulier aux engrais chimiques et organiques utilisés pour améliorer la fertilité des sols qui s'appauvrissent chaque année (Neptune et *al.*, 2010). Par ailleurs, les agriculteurs qui sont faiblement subventionnés par les organismes internationaux en intrants, notamment des engrais minéraux, n'ont pas une bonne maîtrise des techniques d'utilisation des engrais chimiques (Hochmuth et *al.*, 2015 ; Jeune, 2020). Par exemple, des études ont montré que la surutilisation de certains engrais chimiques dans les plaines rizicoles de la vallée de l'Artibonite a entraîné une eutrophisation des eaux due au potassium et au phosphore (Duvivier et *al.*, 2006 ; Bargout et Raizada, 2013). L'utilisation excessive d'engrais chimiques peut conduire à la dégradation de la vie microbienne du sol ce qui entraîne une baisse de sa fertilité à moyen terme (Suquilanda, 1995).

Dans un contexte d'agriculture durable, les décideurs politiques nationaux et internationaux encouragent fortement, comme alternative, l'utilisation d'engrais naturels fabriqués à partir de déchets organiques recyclés en complément ou en remplacement des engrais chimiques. Il a été démontré que l'utilisation d'engrais organiques améliore la fertilité des sols. La plus ancienne forme d'engrais organique est le fumier animal, qui peut être amélioré grâce à des stratégies appropriées de compostage, de stockage et d'application sur le terrain (Rufino, 2006). D'autre part, divers constats sur les transitions écologiques dans le monde indiquent un intérêt à adopter une agriculture plus durable pour améliorer la fertilité des sols (Koopmans et Bloem, 2018 ; Vanden et *al.*, 2014) ; (Benjamin, 2019). À Ouanaminthe, il existe déjà deux organisations locales (le Centre de Recherche d'Etude et de Formation et Kiskya Vèt) qui travaillent dans la valorisation des déchets fermentescibles issus de la biométhanisation pour la production de biogaz et d'engrais organiques liquides (Géocity, 2020). La digestion anaérobique augmente le pH du fumier et également la dégradation des composés azotés (N) (El-Shinnawi et *al.*, 1989 ; Moller et Muller, 2022). Cela exerce une influence potentielle sur les processus de perte d'azote durant la manipulation du fumier et le renouvellement de l'azote du sol après l'apport sur le terrain (Petersen et Sommer 2011). Les engrais liquides fabriqués à partir de déchets fermentescibles méthanisés (lisiers d'animaux et déchets de cuisine) pourraient avoir un impact positif sur l'amélioration du rendement et de la qualité des cultures maraîchères en Haïti. De plus, le système de biométhanisation est une technologie peu connue en Haïti, en particulier chez les agriculteurs ruraux. Cette recherche contribuait à

la valorisation des déchets organiques par un procédé de fermentation anaérobie pour une agriculture durable en Haïti. Plus précisément, il s'agissait de :

- Produire deux fertilisants organiques à travers des déchets biodégradables par le procédé anaérobie ;
- Déterminer les apports en élément nutritifs (NPK, Ca et Mg) de l'effluent de méthanisation et du Thé de bouse de vache ;
- Déterminer le taux de dilution des deux fertilisants liquides pour une meilleure croissance des laitues ;
- Évaluer l'efficacité des biofertilisants liquides sur la croissance et le rendement des laitues cultivées en plein champs.

I. REVUE DE LITTÉRATURE

1.1. Problématique de la fertilité des sols

Selon les estimations des Nations Unies, la dégradation des sols touche aujourd'hui 2 milliards de personnes dans le monde. Elle couvre un tiers de la surface de la Terre et touche des centaines de pays sur tous les continents, en particulier l'Afrique (nord et sud du désert du Sahara), l'Asie centrale, le Moyen-Orient et certaines parties des Amériques. Il n'y a pas de données fiables sur la dégradation des sols, mais elle peut affecter environ 1,9 milliard d'hectares de terres dans le monde (UNEP/ISRIC 1991). Haïti n'est pas non plus à l'abri de cette situation, avec des facteurs biophysiques et anthropiques intrinsèques contribuant à l'infertilité et à l'érosion des sols en Haïti (Lutz, et *al.*, 1994 ; Zimmerman et *al.*, 1986). Le principal facteur biophysique responsable de l'érosion des sols en Haïti est la topographie. Même sans intervention humaine, la topographie d'Haïti expose naturellement les sols à un risque d'érosion plus élevé (Brady, 2010). Un deuxième facteur naturel contribuant à l'érosion des sols en Haïti est les conditions météorologiques (Hylkema, 2011). Un troisième facteur biophysique contribuant à l'infertilité et à l'érosion des sols en Haïti est le type de sol. La formation du sol (pédogenèse) commence par l'altération à long terme des roches mères sous-jacentes, qui en Haïti sont principalement volcaniques ou calcaires (NRCS, 2010). En plus des facteurs biophysiques mentionnés ci-dessus, l'infertilité et l'érosion des sols en Haïti sont accélérées par les activités humaines, qui font que la demande en éléments nutritifs des exploitations agricoles dépasse la capacité de régénération naturelle du sol (Dolisca et *al.*, 2006) adéquatement reconstitué par des engrais synthétiques. La pauvreté en Haïti a entraîné de faibles taux d'application d'engrais, entraînant une supplémentation en minéraux quasi nulle et une productivité réduite (Smucker et *al.*, 2005).

De ce point de vue, la fertilité globale du sol doit être définie par des stratégies appropriées, plus spécifiquement physiques, chimiques et biotechnologiques, pour établir, développer et produire des cultures de manière durable (Alvarez et *al.*, 2008 ; Bravo et *al.*, 2016). Afin d'obtenir des rendements adéquats et soutenus dans le temps, il est nécessaire d'intégrer la gestion de la fertilité et de la fertilisation des sols aux autres composantes de l'exploitation, y compris les aspects de gestion des cultures. Différentes stratégies sont utilisées pour lutter contre les sols pauvres. Les techniques de vermiculture et de compostage se sont révélées être une source rentable d'engrais organiques, bien que leur application dans la pratique soit limitée aux petits jardins familiaux (Misra et *al.* 2003).

1.2. Fertilité chimique

Les stratégies liées à l'optimisation de la fertilité chimique sont liées à un degré adéquat de fertilité physique qui permet un environnement optimal pour les multiples mécanismes de la dynamique des cycles des nutriments, un échange adéquat d'oxygène et d'eau, une réserve organique adéquate et une activité biologique capable d'activer les processus de biodégradation et la biodisponibilité des nutriments. Azabache (2003).

□ Apport des engrais minéraux composés

Les engrais composés combinent plusieurs matières premières pour former des formulations PK, NP, NK, NPK qui apportent plusieurs nutriments généralement du soufre, du magnésium et des oligo-éléments. Les agriculteurs gagnent du temps en fournissant tous ces éléments à la fois (COMIFER, 2017). De nombreuses formulations sont fournies pour répondre aux besoins locaux des sols et des cultures. Ils sont majoritairement solides, mais peuvent également exister sous forme liquide en solution limpide (ce qui peut représenter un dosage au 100 kg ou au 100 L) ou en suspension. Parmi les engrais complexes, on distingue essentiellement les engrais tertiaires NPK et les engrais PK binaires sans azote. Ce dernier est généralement appliqué avant le semis ou avant la plantation et est souvent incorporé au sol par les préparations finales du sol (COMIFER, 2017).

1.3. Fertilité organique

1.3.1. Engrais organiques

La matière organique augmente la fertilité du sol, l'humus avec l'argile constitue le complexe argilo-humique qui régule la nutrition de la plante permettant la fixation des nutriments, de plus, ces nutriments peuvent être assimilés par les plantes au cours de leur cycle productif (Churquina, 2000).

Gomero (1999), soutient qu'il est fortement recommandé d'incorporer des engrais organiques lors de la préparation de la terre en raison des avantages qu'elle apporte, la matière organique constitue une réserve de nutriments en azote, phosphore, potassium et micronutriments, en outre, elle facilite l'utilisation des plantes. De même, il augmente la capacité d'échange de cations CEC et augmente la disponibilité des nutriments dans le sol pour la plante. Les avantages obtenus sont :

- Procurer de l'énergie aux micro-organismes, ce qui augmente l'activité biologique du sol ;

- Il favorise une structure du sol, augmentant sa résistance à l'érosion ;
- Augmente la capacité de rétention d'eau, en particulier dans les sols sablonneux ;
- Libère les nutriments petit à petit, action à long terme ;
- Augmente l'effet de germination des graines ;
- Dans les plantes une plus grande fructification de la quantité et de la taille.

Lampkin (1998), indique que l'incorporation d'engrais organiques au sol aide à modifier les états physiques du sol, à améliorer la capacité de rétention d'eau, ainsi qu'à fournir l'énergie nécessaire à l'augmentation de l'activité microbienne et aide également à protéger les cultures des grands excès de sels minéraux et de substances toxiques, par rapport à sa grande capacité d'absorption qui exerce une action tampon.

Bellapart (1996) a mentionné que les engrais organiques sont connus comme tous résidus d'origine organique, animale ou végétale qui sont utilisés pour augmenter la fertilité des sols, l'utilisation d'engrais organiques est l'une des principales bases de l'agriculture.

1.3.2. Influence de la matière organique sur les propriétés du sol

Chilon (1997) ; Kalmans & Vasquez (1995) ; Gonzales et coll. (1995), se réfèrent aux propriétés physiques, chimiques et biologiques favorisées par l'utilisation de la matière organique, comme détaillé a continuation :

- **Propriétés physiques**

La matière organique peut influencer sur l'amélioration de structure du sol, en outre améliore la perméabilité du sol, augmente la rétention en eau ensuite augmente la température du sol pour une meilleure captation du rayonnement solaire.

- **Propriétés chimiques**

L'engrais organique favorise l'augmentation de la capacité CEC totale du sol, augmente la disponibilité des nutriments en raison de sa propre composition, facilite la formation de composés phosphohumiques qui ralentissent la rétro dégradation du phosphore, de plus corrige la rétro dégradation du potassium en outre empêche les variations brusques de pH d'autre part facilite la production de CO₂ que de réduction de la perte de matière fine due à l'érosion. Se décompose avec de l'eau pour former des acides carboniques.

- **Propriétés biologiques**

La matière organique (stimule) une augmentation de la principale source d'énergie et de carbone pour les organismes hétérotrophes de même, elle provoque la croissance des plantes par action de l'acidité humique sur divers processus métabolique spécifiquement à propos de l'alimentation minérale (Chilon, 1997 ; Kalamans & Vásquez, 1995)

1.3.3. Application et utilisations des engrais organiques

Les engrais organiques sont communément appliqués par voie foliaire, bien qu'ils puissent également être appliqués au sol, à la semence et/ou à la racine. Ils peuvent être utilisés dans une gamme variété de plantes, qu'elles soient à cycle court, annuelles, bisannuelles et vivaces dans les graminées fourragères, les légumineuses, les arbres fruitiers, les légumes, les racines, les tubercules et les plantes ornementales. Son apport dans le feuillage ne doit pas être pure, mais dans des dilutions recommandées (appropriées) de 25 à 75 % d'engrais liquide (Villegas, 2004).

1.4. Engrais organique liquide

Les engrais liquides ou les biofertilisants proviennent de la fermentation de matières organiques, telles que la déjection animale, les restes de plantes, les fruits, etc. La fermentation peut se produire, en absence ou la présence d'oxygène. Provenant de l'activité intense des micro-organismes qui décomposent les matières organiques (Restrepo, 2002).

Le mélange de fumier et d'urine animale est riche en azote et en microéléments, il joue le même rôle que l'engrais foliaire, il a une teneur élevée en acides aminés et augmente l'activité microbienne du sol, appelé lisier, c'est une composée liquide de 20 à 25 % de fumier et 80 à 85 % d'urine (Gomero, 1999).

Les engrais liquides contiennent de l'azote ammoniacal, des hormones, des vitamines et en plus des acides aminés, ces substances régulent le métabolisme des plantes, étant un supplément à la fertilité du sol grâce au gaspillage (à la perte) de matière organique résultant de la fermentation anaérobie et en tant que régulateurs de croissance des plantes qui, appliqués foliairement 20 - 50% favorise la croissance et appliqué au collet de la plante stimule le développement racinaire (Guerrero, 2003).

1.4.1. Effluents de Biométhanisation

La biométhanisation est un procédé contrôlé de dégradation anaérobie de la matière organique dans le but de produire du méthane et/ou de traiter les effluents. La fermentation anaérobie est la transformation de la matière organique par des micro-organismes sans la présence d'oxygène en CH₄, CO₂ et traces d'autres gaz (N₂, NH₃, H₂S, H₂O, CO, O₂) (de Graaf et *al.*, 2010) sous forme de phase gazeuse généralement appelée "biogaz". De plus, la phase liquide-solide est un sous-produit du processus dénommé "digestat" et composé de la fraction lignocellulosique non dégradée, les intermédiaires du processus (principalement les acides organiques), la biomasse microbienne (Frioni, 2011) et une fraction des composés inorganiques disponibles. Cette détérioration se réalise par succession de groupes de micro-organismes dont plusieurs sont liés en synergie. Elle est réalisée en quatre étapes : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthangénèse (figure 1). Ce phénomène a été produit simultanément dans le fermenteur, généralement dans des conditions mésophiles (30 à 40 °C) et avec une période de séjour du substrat de 30 à 60 jours.

➤ Sous – Produits de la biométhanisation

Les phases développées dans la section antérieure sont effectuées de manière superposée dans le même réacteur, ce qui veut dire qu'une partie des composés intermédiaires peut sortir du système en phase gazeuse ou liquide dont le processus n'est pas achevé. Le produit principal de la biométhanisation est le biogaz. Le biogaz contient CH₄ (50-75%), CO₂ (25-45%), H₂S (0-1%), H₂ (0-1%), CO (0-2%), N₂ (0-2) %, NH₃ (0-1%), O₂ (0-2%) et H₂O (2-7%) (de Graaf, et al., 2010). Les pourcentages varient en fonction des matières organiques utilisés, la température de biométhanisation et le temps de rétention. En tant que sous-produit, le digestat est produit sous forme de phase liquide. Il s'agit de matériaux lignocellulosiques non fermentescibles d'intermédiaires de processus tels que des acides organiques et des alcools, des nutriments disponibles et de la biomasse microbienne.

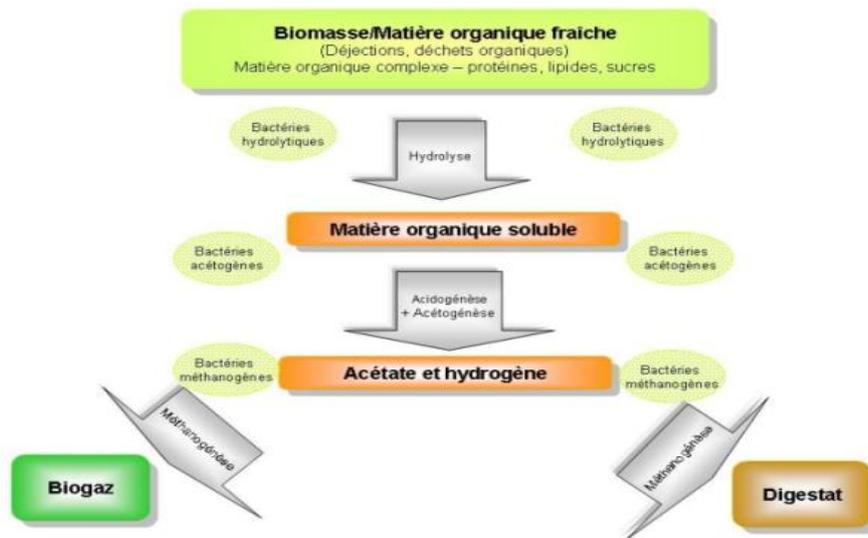


Figure 1. Processus de la biométhanisation

Source : © 2009 Naskeo Environnement

https://www.biogaz-energie-renouvelable.info/methanisation_schema.html

➤ Valeurs fertilisantes de l'effluent de biométhanisation

La teneur en matière organique, en macro et micronutriments du digestat dépend de l'origine des matières organiques et du procédé de digestion utilisé (Möller & Müller, 2012 ; Zirkler et *al.*, 2014). La composition des fumiers varie en fonction du type d'animal (monogastriques vs. ruminants), du sexe, de l'espèce, de l'âge et du type d'alimentation, ainsi que de la situation géographique et des conditions climatiques (Lukehurst et *al.*, 2010). Toutefois, il existe certaines caractéristiques communes à toutes les digestions : elles gardent le niveau des éléments nutritifs totaux, augmentent la fraction disponible des nutriments, particulièrement l'augmentation de la teneur en NH_4^+ contenu par rapport aux types de substrats utilisés, ils concentrent les composés non-dégradés et renferment un reste de composés labiles et de la biomasse microbienne.

➤ La valeur en NPK du digestat

La production d'ion hydroxyde (OH^-) corrélative à celle d'ammonium élève le pH du milieu, ce qui confirme la caractéristique basique du digestat (L.J. Meille, 2016). Le stock d'azote total reste cependant stable par rapport aux intrants non digérés, pourtant les concentrations finales sont plus élevées, du fait du gaspillage d'une quantité de carbone sous forme de biogaz pendant le procédé de méthanisation (Tambone et *al.*, 2009).

Le digestat a une valeur agronomique potentielle dans l'apport du phosphore. Durant le procédé de digestion anaérobie, en théorie le phosphore reste stocker dans le digestat. Certains auteurs indiquent néanmoins de faibles pertes en P (inférieures à 10 % pour Schievano et *al.* (2011) pourtant d'autres observent des pertes jusqu'à 36 % (Marcato et *al.* 2008). La raison est possiblement la rétention et l'emménagement du phosphore sous forme solide dans le réacteur par suite d'une précipitation (Möller & Müller, 2012). Cyril Marcilhac (2014). A l'inverse de l'azote, le phosphore est généralement sous forme solide dans le digestat brut, transformé en phosphate de calcium et struvite. Par exemple, Zhang et *al.* (2012) ont noté sur des échantillons de 9 digestats d'origine agricole une moyenne de 70 % du phosphore sous forme solide, contre 30 % dans le liquide interstitium. La proportion entre phosphore soluble et solide varie malgré tout en fonction des cosubstrats et la gestion du méthaniseur, avec spécialement une forte influence du pH. Paavola et *al.* (2008) ont montré que le phosphore sous forme solide augmentait durant le stockage du digestat, diminuant en conséquence la quantité de phosphore soluble disponible. Dans les sols calcaires, où le pH et la teneur en carbonate sont forts, le phosphore est couramment moins disponible pour les plantes. L'apport de digestat peut se montrer comme une stratégie éminente pour satisfaire les besoins en phosphore des cultures dans ce type de sols (Albuquerque, 2012).

Le potassium se trouve sous forme dissoute et est donc plus concentré dans la phase liquide après séparation des phases (environ 80 % de K se trouve dans la phase liquide). Il faudra donc faire preuve de prudence en cas d'épandage de cette fraction sur des sols pauvres en calcium car un excès de potassium peut augmenter le risque de carence en calcium pour les plantes, les ions calcium entrant en compétition avec l'absorption racinaires d'autres cations tel que le potassium. Selon les résultats obtenus dans le cadre du projet VADIMETHAN au moment de l'essai au champ, ils ont observé que le potassium a été disponible à 100 % dans la plupart des cas pour la culture réceptrice.

➤ **Effet de l'effluent sur les propriétés biologiques et physiques du sol**

De manière générale, on constate que dans certains cas, la méthanisation joue un rôle bénéfique tant au niveau des propriétés physiques que biologiques du sol : augmentation de l'activité respiratoire, activité de nitrification des micro-organismes, biomasse bactérienne, activité enzymatique, capacité d'échange cationique, plus grande abondance de vers de terre (Figure 2). Des cas inverses ont également été rapportés : par exemple, sur des sols peu calcaires et peu tamponnés, une disponibilité accrue des ions potassium peut faire baisser le pH et dégrader la structure du sol (Couturier et Solagro, 2014).

L'apport de digestat augmente la fertilité du sol par une diminution de la masse spécifique de sédimentation et une augmentation de la Capacité de Rétention en Eau (CRE), mais les essais n'ont été réalisés que sur du court terme (Garg et al. 2005 ; Beni et al. 2012). Voelkner et al. (2017) ont également rapporté une amélioration de la CRE après incorporation du digestat dans différents sols sableux et argileux – limoneux, et cela malgré leur postulat de base (la méthanisation produit comme intermédiaires des acides gras qui peuvent amplifier le caractère hydrophobe du sol). Ce phénomène peut s'expliquer selon les auteurs ainsi qu'Hallett et al. (2002) par le ratio champignons/bactéries décroissant.

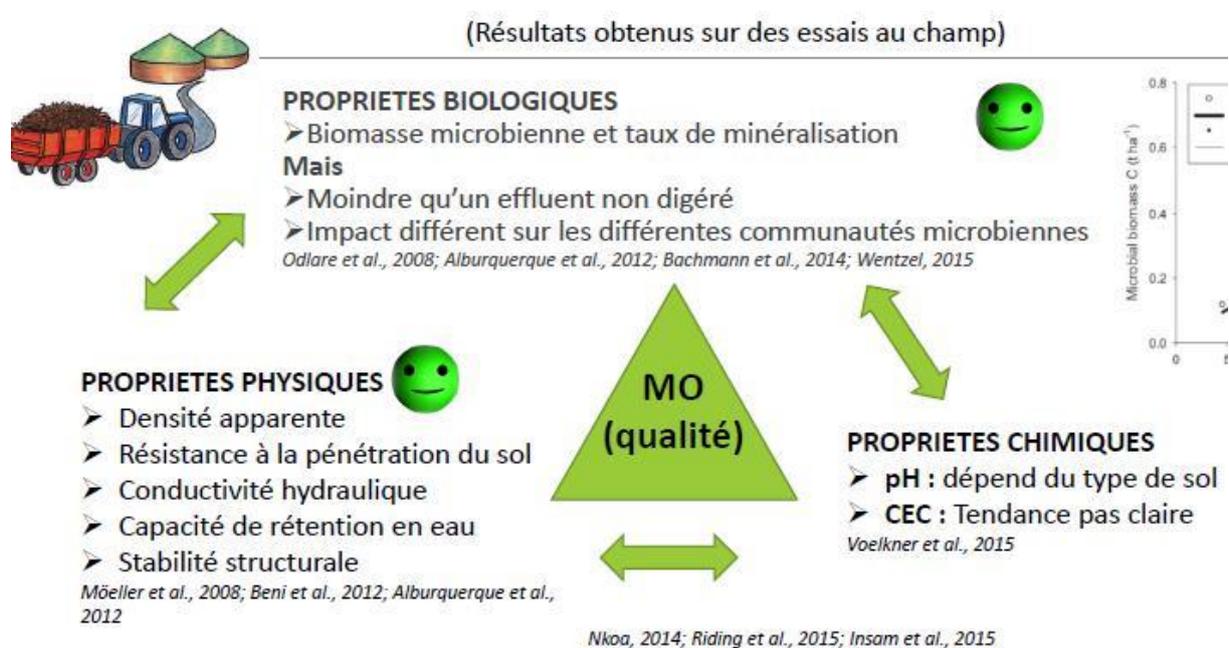


Figure 2. Synthèse des effets enregistrés sur les propriétés des sols, d'après des expérimentations de terrain, Manesseri et Aubry « 16 septembre 2016, SPACE

1.4.2. Thé de bouse de vache

Suquilanda (1995) définit le thé de bouse comme "une préparation qui transforme la bouse solide en engrais liquide". Au cours de ce procédé, le thé libère ses nutriments dans l'eau, les rendant disponibles pour les plantes, et cela se produit dans des conditions anaérobies. Selon FONAG (2010), a montré que le thé de fumier est une préparation qui transforme le fumier solide en engrais liquide. Dans ce processus, le fumier libère ses nutriments dans l'eau et ceux-ci sont fournis aux plantes, cet engrais est riche en potassium, le principal nutriment qu'il apporte au sol.

❖ Préparation du thé de bouse

La démarche pour préparer le thé de bouse est assez simple, remplissez un sac à moitié avec n'importe quel type de fumier, retenir le sac avec une corde en laissant l'une de ses extrémités longue de 1,5 m, ensuite enfoncer le sac avec le fumier dans un fût d'une capacité de 200 litres d'eau, couvrez l'ouverture avec un morceau de plastique et laissez le fumier se transformer en engrais liquide durant deux à trois semaines, enlever le fumier puis de cette manière le fumier sera transformé en engrais liquide (Sanchez, 2011).

❖ La valeur fertilisant du thé de bouse de vache

D'après Guerrero (1999), la bouse de vache après décomposition renferme une proportion de minéraux comme suit : 0,4 % d'azote ; 0,2 % P₂O₅ ; 0,1% K₂O ; 0,1 °C ; 0,06 % MgO et 0,05 sulfate total. Medina (1992), a souligné que le thé de bouse de vache est considéré comme un stimulant complexe qui lorsqu'il est apporté sur les graines ou le feuillage des plantes, il augmentera le nombre de feuilles et augmentera la capacité photosynthétique des plantes, améliorant considérablement le rendement et la qualité des cultures. Cependant d'après COMIFER (2017) le lisier de bovin dilué en système couvert est composé en moyenne respectif de 2,7 N, 1,1 P₂O₅, 3,3 K₂O en kg / tonne (tableau 1).

Tableaux 1. Valeurs fertilisantes des lisiers de bovins

Dénomination	Composition moyenne en kg.t ⁻¹		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Lisier dilué en système couvert	2,7	1,1	3,3

Source : (COMIFER, 2017)

❖ Amélioration de de la structure du sol

Selon le CIPCA (2001), les processus de minéralisation et de décomposition consistent notamment à nourrir le sol afin que les micro-organismes présents, après avoir dégradé la matière organique et les minéraux, puissent transformer les nutriments en formes facilement assimilables que le sol puisse ensuite être absorbés par les racines des plantes pour faciliter leur croissance et leur fructification. Il possible d'apporter des matières organiques d'origine végétale ou animale, comme de la paille, des déchets agricoles, de l'humus, du compost, etc. Il est également montré que la matière organique est une source d'azote dans le sol, avec 5 à 60 % de phosphore et 80 % de soufre (Dominguez, 1984). Avalos (2003), a souligné que

l'engrais liquide ne laisse pas de résidus toxiques dans le sol, il améliore la qualité du sol et peut être considéré comme un bon engrais chimique.

❖ **Amélioration des plantes**

Flower (2017), souligne qu'à travers les racines, elles absorbent l'eau du sol dans laquelle les nutriments sont dissous. Medina (1992), indique que lorsque le but est de planter des racines, il recommande d'immerger ces organes dans une solution à 12,5 % durant cinq minutes au maximum et, une fois aérés, ils peuvent être après plantés.

❖ **Utilisation du thé de bouse de vache**

Avalos (2003), mentionne que le purin peut être utilisé sur une grande variété de plantes, qu'elles soient à cycle court, annuelles ou pérennes, des graminées une grande variété de plantes, qu'elles soient à cycle court, annuelles ou pérennes, graminées, fourrages, légumineuses, avec des applications dirigées vers le feuillage, le sol, les graines ou les racines. Un litre de thé de bouse est mélangé à 4 à 5 litres d'eau. La façon de l'appliquer aux cultures est la suivante la technique DRENCH, qui consiste à appliquer l'engrais liquide directement sur les racines et les tiges. Une fois que le thé mélangé à l'eau pure, nous le mettons dans la pompe. Si nous n'avons pas de pompe, nous pouvons appliquer avec un récipient commun ou un pot, selon les besoins de la culture et de la qualité du sol. L'application peut être répétée dans 8 à 15 jours, en tenant compte des cycles de la culture traitée.

1.5. Normes applicables sur l'utilisations des fertilisants organiques

1.5.1. Règlement « Fertilisant » 2019/10091 de la Wallonie

L'Union européenne a adopté le 5 juin 2019 le nouveau Règlement « Fertilisants » 2019/10091 : il est entré en vigueur le 16 juillet 2019 et sera d'application en 2022. Il concerne l'ensemble des engrais et des amendements de sol, que leur origine soit issue de l'extraction, de procédés chimiques, ou encore de matières recyclées ou organiques. Ce Règlement vient remplacer le Règlement « Engrais » 2003/20032.

Dans ce règlement nous avons tiré la valeur agronomique du digestat liquides de biométhanisation et d'autres fertilisants organique liquide, selon la norme établit par Valbiom (Tableau 2), (VALBIOM, 2020).

Tableau 2. Valeurs agronomiques des digestats liquides et engrais organiques liquides selon le Règlement Fertilisants (exprimé en % de matière brute) en Wallonie

Digestat Sur base des moyennes établies par REQUASUD		Règlement Fertilisant
Paramètres	Phase liquide	Engrais organique liquide
MS	4,90%	
MO	2,90%	
Corg (= MO * 0,56)	1,62%	> 5 %
Ntot	0,47%	> 1 %
Norg		
P2O5 tot	0,17%	> 1 %
K2O tot	0,28%	> 1 %
NPK	0,92%	> 3 %

Source : (Valbiom, 2021)

1.5.2. Normes ou Règlements des engrais organiques selon AFNOR

La norme NFU 42-001, dédiée aux engrais minéraux, organiques et organo-minéraux, date de décembre 1981 (AFNOR, 1981). A ce jour, la norme NF U42-001 couvre les engrais organiques tels que le fumier, les engrais organiques issus de déchets animaux et végétaux et les drêches de distillerie, qui décrit les caractéristiques, noms et spécifications des engrais (Leclerc et al., 2012). Par ailleurs, après une refonte complète, la norme est divisée en trois parties (Anses, 2014), à savoir : NF U 42-001-1 ; NF U 42-001-2 et NF U 42-001-3. En conséquence, la norme sur les engrais minéraux (NF U 42-001-1) a été publiée en octobre 2011 et a cessé d'être obligatoire en 2012 (AFNOR, 2011). Cependant, les normes « Engrais Organiques » (NF U 42-001-2) et « Engrais Minéraux Organiques » (NF U 42-001-3) sont en cours de finalisation (Anses, 2014). Par ailleurs, l'amendement A10 à la norme NF U 42-001 (1981) pour les engrais organiques a été publié en décembre 2009 et est devenu obligatoire en 2010 (NF U 42-001/A10) (AFNOR, 2009 ; Anses, 2014). Par ailleurs, selon l'IFV (2010), la norme NF U 42-001 précise la teneur des principaux nutriments à respecter.

- Un élément majeur des engrais minéraux N, P2O5, K2O,
- Les engrais organiques NPK, NP, NK doivent contenir au moins 3% d'un élément majeur ou $N + P2O5 + K2O \geq 7\%$,

En effet, le contrôle des engrais organiques est réglementé par les textes suivants (BVC, 2009 ; Anses, 2014) :

1.2.1. Norme NF U 42-001 (1981),

1.2.2. Norme NF U 42-001/A10 (2009),

1.2.3. Arrêté du 5 septembre 2003 relatif aux contrôles des responsables de la commercialisation des matières fertilisantes et des supports de culture.

Concernant les contrôles à effectuer, le texte précise en l'absence d'exigences analytiques précisées dans la norme relative au produit. Comme dans le cas de la NF U 42-001 Engrais, le Responsable Marketing poursuit (IFV, 2010) :

- Analyse d'un échantillon représentatif du produit mis sur le marché pour chaque paramètre déclaré sur l'étiquette ;
- Analyse régulière et toute modification de l'origine ou de la nature des matières premières utilisées ;
- Évaluation périodique des risques éventuels causés par la présence d'éléments traces métalliques, de bactéries pathogènes humaines et animales, d'autres contaminants potentiels (ex. composés organiques traces, éléments inertes). La fréquence d'analyse dépend des critères et du volume des ventes.

- **Innocuité pour l'environnement et la santé publique**

Selon l'Institut français de la vigne et du vin (IFV, 2010), l'innocuité désigne l'absence d'effets négatifs sur la santé de l'homme, des animaux, des végétaux et de l'environnement dans des conditions normales d'utilisation d'une substance certaine. Les engrais (MF), dont les fonctions sont attendues positives par rapport à la croissance des organismes vivants, devraient logiquement faire l'objet de plusieurs analyses, à savoir : toxicologie et santé Sécurité du travail, des résidus et des consommateurs, toxicité environnementale et écologique et in fine efficacité (UNIFA, 2010). Ces analyses portent sur le risque environnemental que l'utilisation de matières fertilisantes peut faire peser sur les milieux aquatiques, terrestres et végétaux. Elles reposent également sur l'estimation du devenir, de la teneur et du comportement des matières fertilisantes dans l'environnement (sol, air, eau) pour l'homme et l'animal (Jonis, 2008).

Selon Constant (2011), la problématique de la vérification de l'innocuité des MF vis-à-vis des éléments traces métalliques (ETM, ex : arsenic, cadmium, plomb...), des oligo-éléments organiques (COT, ex : fluoranthène, benzo (b) fluoranthène...) et des microorganismes pathogènes (Salmonelles, Escherichia coli ...).

- **Efficacité des matières fertilisantes**

Selon Jonis (2008), la vérification de l'efficacité est effectuée dans les conditions d'utilisation recommandées, sur la base de la réalisation et de l'analyse des tests effectués dans les conditions d'utilisation recommandées. Il est vérifié en analysant les données des essais pour pouvoir comparer, au minimum, un régime à base de produit et un régime sans produit (Témoin non traité).

1.6. Cas d'étude réalisés

1.6.1. Essais réalisés sur l'efficacité de certains effluents organiques

Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation des engrais organiques afin de comprendre leur efficacité sur la croissance et le rendement des cultures. C'est sur la base du même point de vue que (Carlos et *al.*, 2015) ont mené une expérience sur l'évaluation économique de la betterave à sucre (*Beta Vulgaris var*) en utilisant les eaux usées comme engrais organique. Dans cette étude, la digestion anaérobie du fumier de vache et de porc a été évaluée pour produire du biogaz comme source d'énergie alternative et engrais (lisier) pour la culture de légumes. Les résultats obtenus à partir de ce travail ont confirmé que les effluents issus de la digestion anaérobie des lisiers de porc favorisaient significativement le développement des plants de betterave sucrière, avec une augmentation de 22,7% de la production totale de biomasse des parties aériennes des plants de betterave par rapport à celle obtenue avec le contrôle et à moindre coût. Ainsi il été démontré que la majorité des plantes présentaient des poids supérieurs à 150 g, alors que dans le cas du témoin, les poids se situaient entre 51 et 100 g. Avec l'effluent obtenu à partir de la digestion de la bouse de vache, ainsi qu'avec un concentré commercial de phytohormones, aucune amélioration du poids des plantes n'a été constatée.

Un autre essai effectué par Soil Science en 2015 sur l'usage de digestat anaérobie de lisier de porc sur l'activité biologique du sol et développement des plantes dans l'objectif d'évaluer l'activité biologique du sol et le développement de la laitue (*Lactuca sativa L.*). Après l'application de taux croissants de digestat de porc, de lisier de porc et de deux engrais chimiques : Urée et Urée + Phosphate Diamonium (DAP). Les résultats de cet essai ont affirmé qu'une réponse positive linéaire pour l'activité biologique et le développement des plantes a été observée après l'application de doses croissantes de digestat. En outre l'activité biologique la plus élevée a été observée après 168 heures dans le lisier de porc, suivi par le digestat, l'urée, l'urée + DAP et le contrôle. L'activation du microbiote a été observée à 6

heures pour le digestat, à 12 heures pour les engrais chimiques et à 24 heures pour le lisier de porc. Le lisier de porc a atteint le poids frais de laitue le plus élevé, suivi par le digestat. Ce dernier s'est différencié du traitement témoin, mais pas du traitement par engrais chimique. Il est conclu que, dans les premières heures, le digestat a produit une augmentation rapide de l'activité biologique du sol et une réponse positive dans le développement de la laitue, identique à ce qui a été enregistré avec les engrais chimiques.

1.6.2. Travaux réalisés sur la fertilisation de la laitue

En 2009 Rotondo a étudié l'effet des amendements organiques et de l'application d'engrais azotés sur les propriétés du sol d'engrais azoté et la productivité dans et la productivité des cultures horticoles, réalisé à la Faculté des sciences agricoles de l'UNR (Rotondo *et al.*, 2009). Au cours de l'essai, l'auteur a évalué les effets de divers amendements organiques et d'engrais organiques tels que le lombricompost à partir de fumier de lapin et de fumier de cheval ; litière de poulet à des doses de 1 et 2 kg-m⁻² sur base sèche durant 2003-2005, à une dose de 2 kg-m⁻² associée à de l'urée (46% N) et un témoin. Dans le sol, les éléments qui ont été évalués sont le carbone organique, la conductivité hydraulique à débit saturé, pH, conductivité électrique, stabilité structurelle. Les résultats de cette recherche ont approuvé que chez la laitue, il y avait des différences pour la dose la plus élevée dans la première phase. L'effet des amendements sur la productivité a été important durant les premières années, cependant la fertilisation a influencé les dernières années. A cet effet les amendements organiques ont considérablement amélioré les conditions du sol par ailleurs la fertilisation azotée a augmenté la productivité de la laitue.

L'analyse sensorielle de la laitue (*Lactuca sativa* L.) cultivée avec du compost de litière porcine incorporé dans le sol a été étudié par (Mackinson *et al.*, 2020), cet essai a révélé que laitue traitée avec le compost de litière profonde de porc compost ajouté au sol aurait une plus grande plus grande probabilité d'être choisie par le consommateur.

(Yoon *et al.*, 3006) a fait une étude de comparaison de l'accumulation de nitrate dans la laitue cultivée avec des engrais chimiques ou du compost. Il a été observé que la teneur en NH₄-N dans les sols des applications de compost étaient beaucoup plus faibles que ceux trouvés dans les sols des applications d'engrais chimiques. Deux semaines après la transplantation de la laitue NH₄-N n'a pas été trouvé dans les sols où l'on a appliqué du compost, et dans les sols où l'on a appliqué des engrais chimiques. NH₄-N n'a pas été trouvé trois semaines après la transplantation de la laitue. Une semaine après la transplantation de la laitue, la teneur en

NO₃-N était beaucoup plus élevée dans les sols où le compost avait été appliqué, et les teneurs ont rapidement diminué. Alors que, la teneur en NO₃-N dans le sol de l'application d'engrais chimiques a rapidement augmenté en raison de la nitrification de NH₄ libéré par l'urée appliquée. Au moment de la récolte, les teneurs en NO₃-N dans les sols des applications de compost étaient inférieures à 1,4 mg/kg, mais dans les sols des applications d'engrais chimiques, la teneur en NO₃-N était de 54,2 mg/kg. La teneur en NH₄ dans la laitue était d'environ 20 mg/kg et n'était pas très différente entre les traitements. Cependant, les teneurs en NO₃ dans la laitue étaient significativement différentes entre les traitements d'engrais chimiques et de compost. Il y avait des différences significatives dans les poids frais et secs, et la croissance de la laitue dans le traitement de compost de 4,000 kg/10 a été la plus élevée parmi les traitements. Ces résultats indiquent que la culture avec le compost uniquement comme source de N peut produire un rendement plus élevé de laitue et réduire significativement l'accumulation de nitrate par rapport à la culture conventionnelle avec des engrais chimiques.

Dans l'étude menée par Albert en 2018, sur l'effet de la fertilisation à l'aide des déchets ménagers solides compostés dans les décharges sur le rendement et la qualité chimique de la laitue, les résultats ont révélé que les teneurs en matières organiques (12,15 %) et en azote (0,65 %) du compost utilisé sont relativement élevées comparativement à la norme AFNOR, d'où une valeur fertilisante assez intéressante de ce compost. Ensuite, les teneurs en éléments traces métalliques toxiques, notamment le fer (1,911 mg.kg⁻¹) et le zinc (1,55 mg.kg⁻¹) enregistrées dans ce compost sont-elles très faibles et inférieures aux limites critiques définies dans les sols agricoles par la législation suisse.

1.7. Culture de laitue

1.7.1. Généralité sur la culture de la laitue

Comme la laitue est consommée toute l'année, il y a toujours une forte demande pour ce produit sur le marché. La plante est riche en vitamines. Contient 94,8 % d'eau, 1,2 % de protéines, 0,2 % de protéines, 0,2% de matières grasses et 2,9 % de glucides. A l'état brut, il contient de fortes doses de vitamines A, B, B, C, E et de minéraux (Estévez, 2020).

Taxonomie : Famille : Asteracea, Genre : Lactuca, Espèce : sativa et Parrain : Linné (E. Křístková et *al.*, 2008). *Lactuca sativa* est une plante annuelle glabre avec une racine pivotante fine et une tige dressée de 30–100 cm de hauteur, ramifiée dans la partie supérieure.

Les feuilles sont disposées en spirale, formant une rosette dense ou une tête avant verrouillage (Grulich 2004).

1.7.2. Exigences Eco-physiologiques

➤ Température, humidité relative, luminosité

Les graines de laitue germent à une température variante entre 20 et 26 °c, avec une optimale de 24°C cependant pendant la phase de croissance de la culture les températures varient de 14 à 18 °C. la laitue a pour besoin un écart de température entre le jour et (la nuit, donc 7°C est nécessaire (Osorio & Lobo, 2003). Pour un bon développement de la laitue elle nécessite une humidité relative variant entre 60 à 80% car une humidité trop élevée peut causer des problèmes de maladie telle que la moisissure blanche causée par *Sclerotinia sclerotiorum*, la moisissure grise causée par *Botrytis cinerea* et l'oïdium causé par *Bremia lactata* (Alzate & Loaiza, 2008). Selon Valdez (1997), la laitue peut se développer dans des conditions de photopériodique longue soit 12 heures de lumière avec une température de 26°C car les plantes ont besoin d'une lumière élevée pour que le feuillage pousse mieux en termes de volume, de poids et de qualité, car ces plantes sont très exigeantes en lumière et il a été prouvé que le manque de lumière rend les feuilles minces et dans de nombreux cas.

1.7.3. Fertilisation de la laitue

➤ Sol et besoins minéraux

La laitue requiert un sol ayant une structure stable, une bonne rétention en eau, mais aussi une bonne aptitude au ressuyage en surface et une teneur élevée en humus qui permet un réchauffement rapide du sol. La laitue ne tolère pas l'excès d'acidité elle préfère la neutralité : un pH situé entre 6,7 et 7 est recherché. Ce légume feuille craint également les excès de salinité (plus courant en culture sous serres). Au fur et à mesure que la plante croit, les besoins en azote augmentent sensiblement. L'augmentation de la disponibilité en azote dans le sol est directement corrélée à une augmentation de poids, mais aussi à un risque d'accumulation de nitrate dans la plante (jusqu'à 6.000 ppm). L'excès d'azote augmente le risque de retard de pomaison et de maladies (Botrytis). Une carence en cet élément provoque la formation de pommes plus petites et des retards de croissance (CIM & ASBL, 2007).

Le phosphore est généralement suffisant pour cette culture dans les sols des exploitations maraîchères. A basses températures, des reflets rougeâtres en marge des feuilles sont des

indices de carences. En effet le potassium est un élément qui limite les effets de la sécheresse. Les besoins sont sensiblement supérieurs en régime de faible éclaircissement. Par ailleurs un rapport K/N de 3/1 est un minimum. Un rapport plus faible (1,5), favorise la nécrose marginale. Des teneurs en calcium suffisantes sont requises pour éviter les risques de tip burn ou de nécroses marginales. Puisque la laitue est sensible aux carences en oligo-éléments (Bo, Mo, Zn, Cu), les apports de fumier en entretien lors des cultures précédentes et un chaulage raisonné limitent les risques. Etant sensible au chlore, il faut faire attention à la présence éventuelle de celui-ci dans l'eau d'irrigation.

➤ **L'apport de NPK par fraction**

Il est recommandé d'apporter 50 U à la plantation, ensuite il faut apporter ± 50 U (en fonction de la saison puisque la minéralisation de la matière organique du sol peut suffire en été et en automne). Pour le phosphore 80 U peut être apporté en totalité à la préparation du sol. Quant au potassium 140 U est requise en totalité à la préparation du sol.

1.7.4. Rendement de la laitue

Pour une densité de plantation 30 cm par 30 cm, la production moyenne de laitue pommée (Batavias) se situe entre 22.500 à 30.000 kg/ha. Dans le type "Romaine", il s'élève à soit 45.000 kg par hectare, environ (Estévez, 2020).

II. PHASE EXPÉRIMENTALE

2.1. Cadre physique de l'essai

- **Presentation géographique de la zone de l'étude**

La commune de Ouanaminthe fait partie du département du Nord-Est dont le chef-lieu est Fort-Liberté. Elle est bornée au Nord par : Les communes (Ferrier et Fort-Liberté) et la République Dominicaine ; au Sud par : La commune de Mont-Organisé ; à l'Est par : La commune de Capotille et la République Dominicaine et à l'Ouest par : La commune de Fort-Liberté. Ouanaminthe a une superficie d'environ 220 km² et se divise en 5 sections communales : Haut Maribaroux, Acul des Pins, Savane Longue, Gens de Nantes et Savane au lait (figure 3).

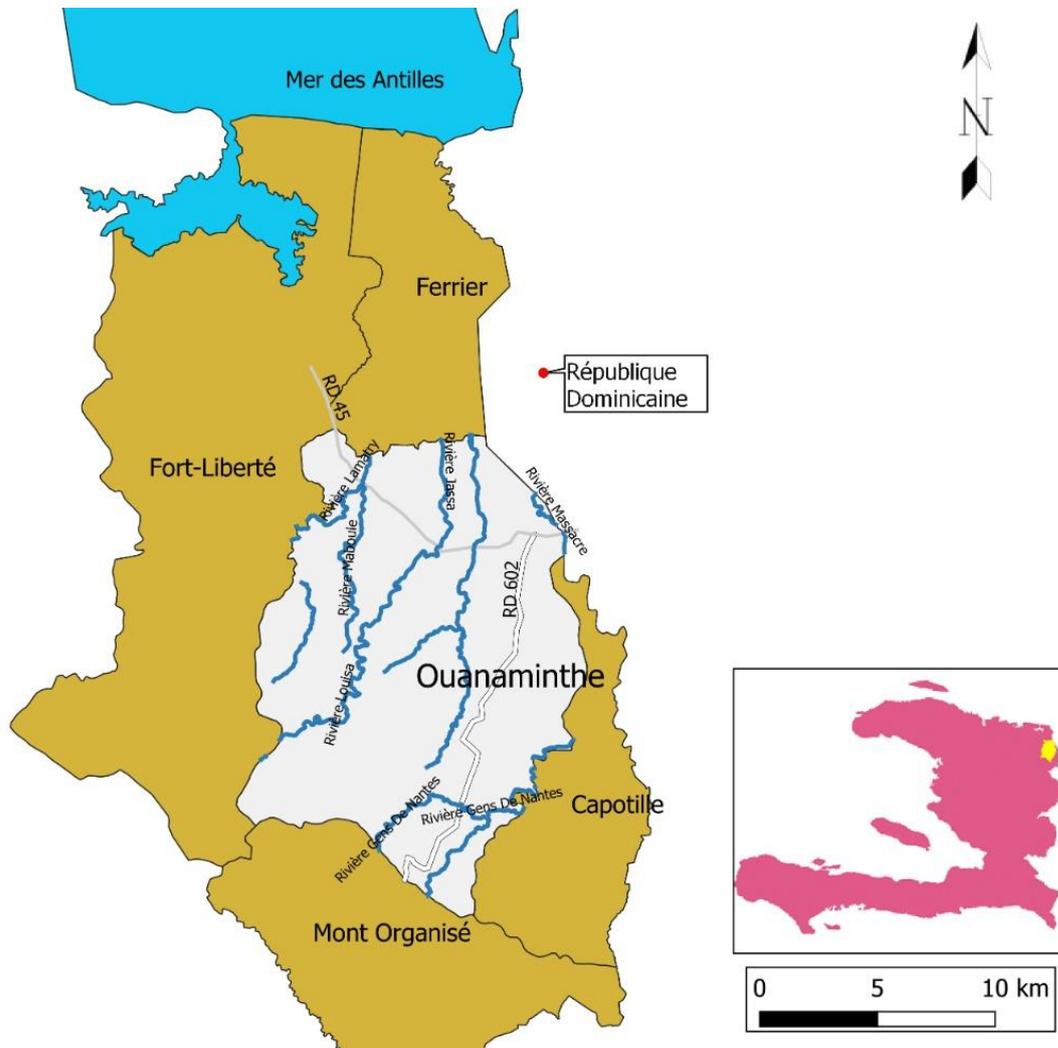


Figure 3. Représentation géographique de Ouanaminthe

- **Climat**

Ouanaminthe a un climat de type tropical. La température annuelle moyenne de la zone est 25.5 °C. Le mois d'août avec une température moyenne de 28.0 °C est le mois le plus chaud de l'année. Alors que, janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de 23.1 °C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 855 mm de pluie. Toutefois, il faut signaler que le mois de février est le mois le plus sec de l'année avec une faible précipitation annuelle en moyenne de 26 mm de pluie. Tandis que le mois de mai est la période de l'année où les précipitations sont plus élevées avec une moyenne de 131.0 mm de pluie. L'humidité relative la plus élevée est mesurée en octobre (78.03 %) et la plus basse en juillet (65.48 %) (figure 4).

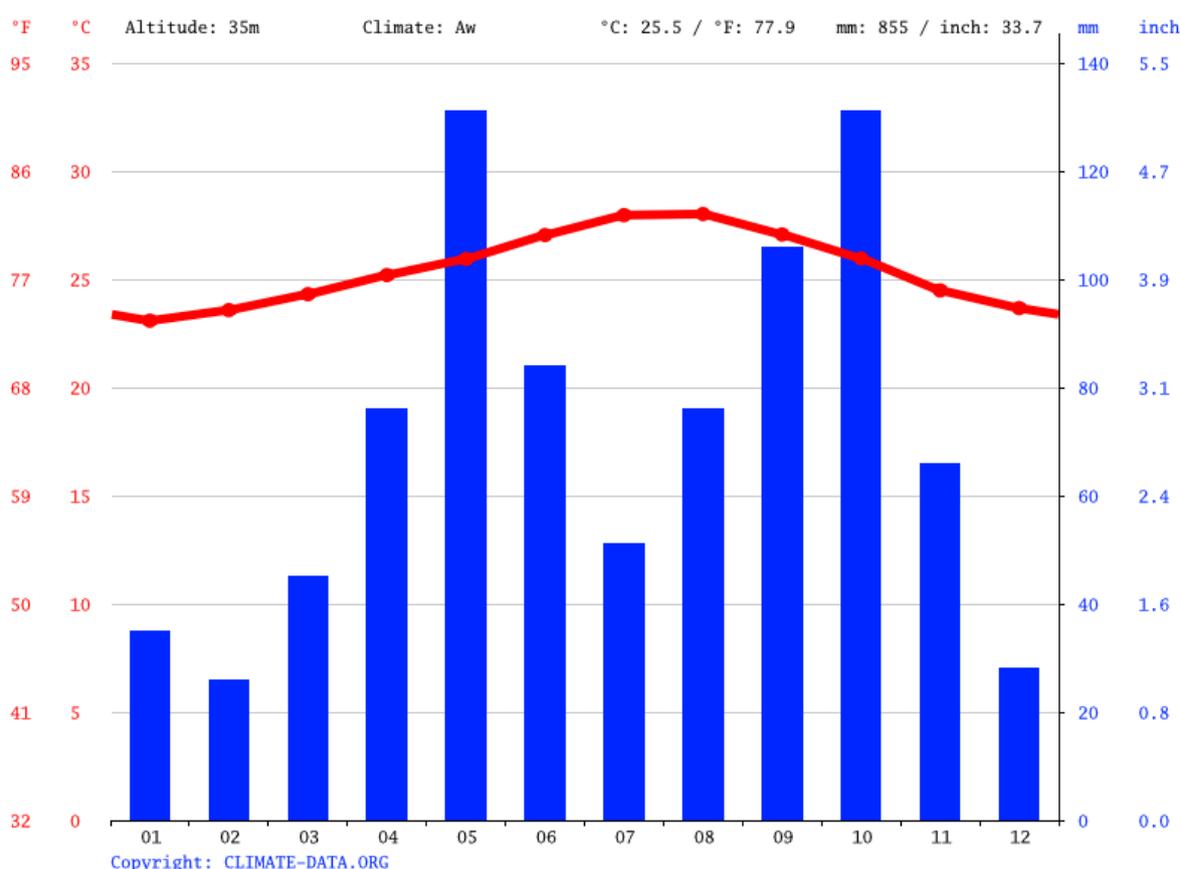


Figure 4. Température et pluviométrie de Ouanaminthe

Source : <https://fr.climate-data.org/>

- **Sols et ressources en eau**

La commune de Ouanaminthe a un relief dominé par les plaines. C'est une zone favorable à l'agriculture. Les sols sont riches et profonds de nature alluviale. Ils sont régulièrement

régénérés par des dépôts d'alluvions limoneux ou argileux (Victor, 2012). Cette zone possède un réseau hydrographique important Les principaux cours d'eau sont : Jassa River, Lamatrie, Massacre Canari, sable, Ti Rivière. Il existe des périmètres irrigués au niveau de la plaine permettant de pallier les raretés des précipitations enregistrées à certaines périodes de l'année.

- **Localisation du site de l'essai**

L'essai a été réalisé sur la ferme expérimentale de l'ONG locale CREF (Centre de Recherche d'Etude et de Formation), à Haut Maribaroux, 1ère section de la commune de Ouanaminthe dans le Nord'Est d'Haïti. Cette section communale s'étend sur une superficie de 31 Km² et elle est située à environ 12 km du centre-ville de Ouanaminthe, plus précisément entre 19 ° 33' 11.2"N - 71° 5'15.7" W (figure 5).

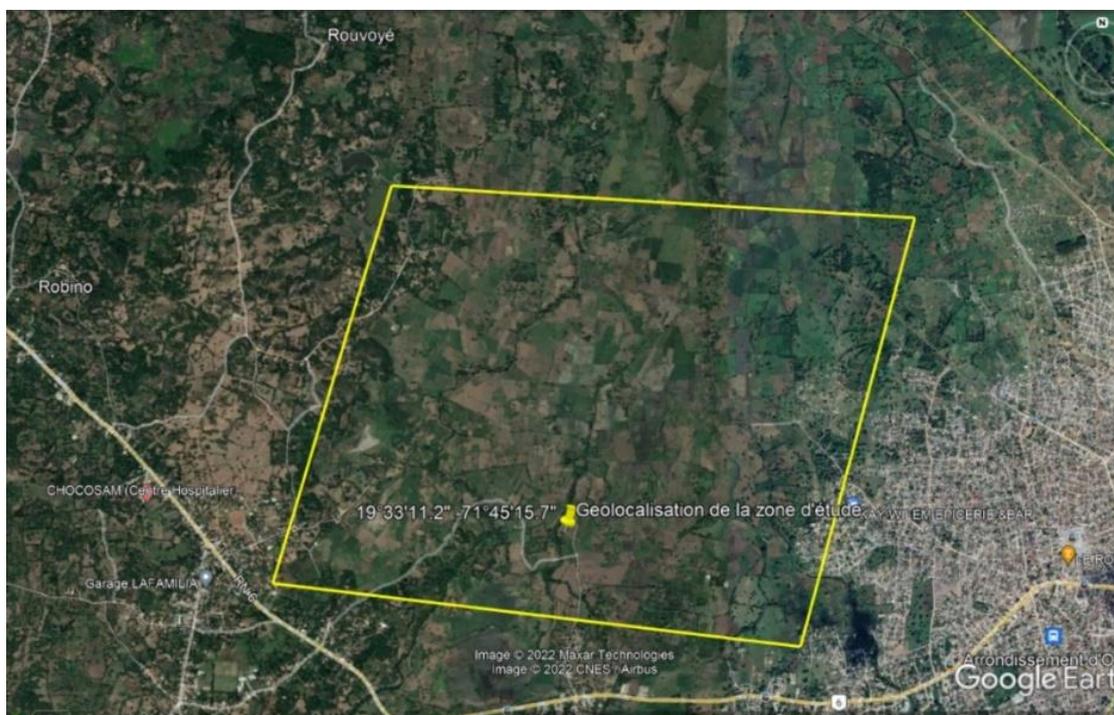


Figure 5. Localisation du site de l'étude

2.2. MATÉRIELS

2.2.1. Matériel végétal utilisé

La laitue (*Lactuca sativa* L.) est une plante herbacée annuelle, dicotylédone, autogame, appartenant à la famille des Astéracées (Romani et *al.*, 2002). Dans cette étude, la variété de laitue feuille de chêne (*Lactuca sativa* var. *Cripsa*) a été utilisée. En effet, c'est une variété qui ne forme pas de pomme mais donne des feuilles tendres fondantes et non croquantes. Les

feuilles ont généralement une hauteur en dessous de 20 cm. Les feuilles ont une couleur qui varie de vert à pourpre. Elle requiert un arrosage régulier (figure 6).



Figure 6. (a) Emballage des laitues ; (b) paquet en gramme ; (c) semences et de laitue

2.2.2. Fertilisants utilisés

Dans cette étude, deux (2) fertilisants ont été utilisés : Un effluent de biométhanisation et un thé de bouse de vache. Ces deux fertilisants liquides ont été préparés sur le site de production de l'ONG-CREF. Le thé de bouse de vache a été préparé selon les techniques traditionnelles des agriculteurs de la plaine de Haut Maribahoux. Tandis que, l'effluent de biométhanisation est une technologie innovante en Haïti, mise en essai par le Centre de Recherche d'Etude et de Formation (CREF) / Kiskeya Vèt au niveau du pays en vue de sa vulgarisation et sa commercialisation.

Un fertilisant chimique liquide a été comparé aux deux effluents organiques pendant la période de l'essai. En effet, le Bayfolan ® forte de composition (110 g/L N ; 80 g/L P₂O₅ ; 60 g/L K₂O ; 1500 mg/l S ; 250 mg/L) a été utilisé. C'est un engrais foliaire contenant des éléments majeurs et éléments mineurs. Il est un bon stabilisateur de pH et permet de prévenir et de corriger les déficiences nutritionnelles.

2.2.3. Préparation des fertilisants

- **Thé de bouse de vache**

Pour la réalisation du thé de bouse de vache, plusieurs sources de matières premières ont été combinées [40 kg de bouse de vache ; 5 L d'urine de vache ; 10 L de lait de vache ; 2 kg de farine de légumineuse ; 160 L d'Eau et 4 L de sirop de canne à sucre (mélasse)]. Pour

mélanger les différentes substances utilisées, une Cuvette en plastique a été utilisée et un bâton en bois de 180 cm a permis d'effectuer leur brassage. Tout le mélange a été versé dans un fut plastique de 200 L avec une couverture hermétique. Ce fut plastique était muni d'un tube à gaz de diamètre 3/8 et 183 cm de long et se terminant par une bouteille plastique d'1 L permettant de récupérer l'acide sulfurique produit durant le processus de décomposition des matières organiques dans le fût (figure 7). Une balance de marque " Hanging Scale" de capacité maximale 50kg a été utilisée pour peser les substances. Un Conductimètre de marque Hanna a été utilisé pour mesurer le pH, la température et la conductivité électrique de la solution nutritive.

La préparation du Thé (FT) a été réalisée en trois étapes :

1. La première étape consistait au prélèvement et au mélange homogène des matières liquides (sirop de cannes, l'eau, urine de vache, du lait) dans une cuvette.
2. Dans la seconde étape les matières premières solides (bouse de vache, farine de légumineuse) ont été pesées et mélangées.
3. La troisième étape consistait à mélanger de manière homogène les produits liquides et solides dans un fût en plastique contenant 160 litres d'eau. Ce mélange a été remué dans les deux sens, pendant 5 minutes. Par la suite, le récipient a été fermé hermétiquement. Un tuyau a été adapté dans le fut sans toucher avec le mélange et il a été conduit dans une bouteille d'eau afin de récupérer l'acide sulfurique. De cette manière le gaz produit durant la fermentation s'échappe par la bouteille sans que l'air n'entre pas dans le fût sinon le fertilisant finira par sentir la moisissure et il ne sera pas utilisable. Au bout de 30 jours, le Thé a été prêt à être utilisé. Les différentes matières premières ont été obtenues sur le site de l'étude (figure 7).



Figure 7. (a) Préparation du thé de bouse ; fermentation anaérobique ; (c) le thé

- **Effluent de biométhanisation**

Pour la préparation de l'effluent de biométhanisation, un biodigesteur artisanal de type familial fabriqué par une compagnie dénommée « Haïti Biogaz » a été utilisé à cet effet (figure 8). Ce dispositif de biométhanisation a été construit avec des matériels peu coûteux et localement disponibles. Les matières premières provenant des déchets animaux et de cuisine ont été utilisés pour la fabrication de l'effluent : 20 kg de déjections d'animaux contenant (lisier de bovin, lisier de porc, déjection de caprin, cheval et fiente de volaille) ; 16 kg de résidus de cuisine ; 60 litres d'eau, en fin 3 kg de chaux ont été ajoutés afin de permettre d'avoir une bonne gestion du pH (Eral et *al.*, 2006). Le processus de fermentation a été produit dans des conditions mésophiles (30 à 40 °C) pendant une durée de 30 jours (figure 8).



Figure 8. (a) Déchets organiques utilisés ; (b) fermentation anaérobie ; (c) l'effluent

2.3. Méthodes

2.3.1. Dispositif expérimental

L'essai a été conduit avec quatre (4) traitements constitués de trois types de fertilisants : [Un effluent de biométhanisation (FB) ; un thé de bouse de vache (FT) et un fertilisant chimique liquide (FC)] et un témoin (T). Les quatre (4) traitements avec trois (3) répétitions ont été répartis de façon aléatoire dans un dispositif en Blocs Aléatoires Complets (DBCA) afin de contrôler le gradient de fertilité dû à l'effet des pentes. La combinaison des traitements et des répétitions a donné 12 unités expérimentales (4 traitements×3 blocs). Les unités expérimentales (platebandes) avaient 1 m de largeur et 2 m de longueur ; ce qui a donné une superficie de 2 m² pour chacune. Elles ont été séparées entre-elles par des allées de 1 m de large et 1 m entre chaque bloc. Cet essai a été réalisé sur une parcelle de 10 m de longueur x 9 m de largeur. En somme, la superficie totale utilisée a été 90 m² (figure 9). Sur les

platebandes, l'écartement entre les lignes a été de 0.3 m soit 3 lignes de plantation par platebande ; l'écartement entre les plantes a été de 0.3 m soit 6 plants par lignes de plantation ; d'où le nombre de plants par unité de surface (platebande) a été de 18 plants. Ce qui a donné un total de 216 plants pour les 12 unités expérimentales.

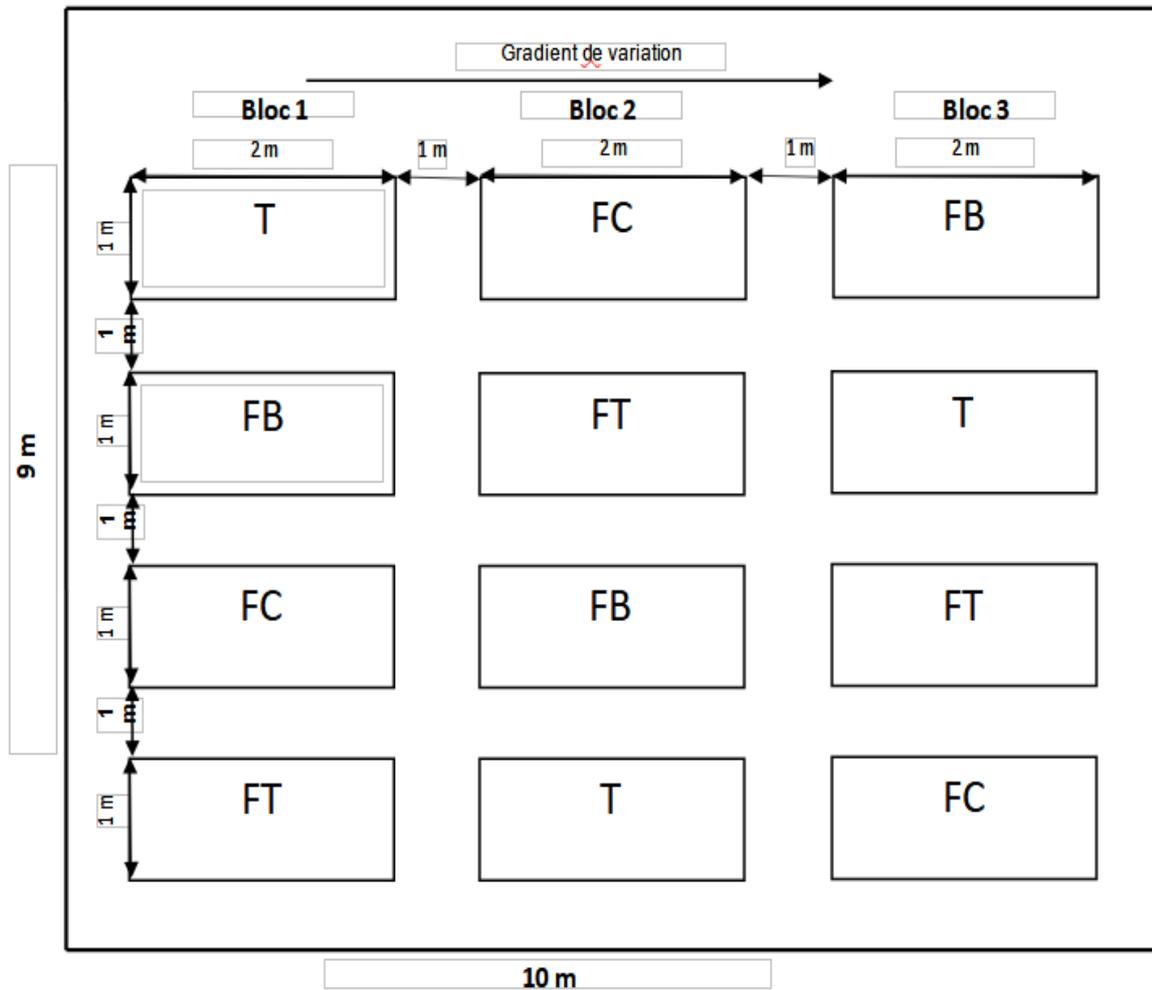


Figure 9. Présentation du dispositif expérimental

2.3.2. Conduite de l'essai

- **Mise en place de la pépinière**

La mise en place des semences de la laitue a été réalisée le 8 avril 2022 sur une plate-bande faisant 1 m² de surface. Le substrat a été composé d'un mélange de terre noir, compost et du sable de rivière. La pépinière a été réalisée sous une ombrière afin de protéger les plantes

contre les forts rayonnements du soleil. La pépinière a été arrosée quotidiennement pendant 21 jours (figure 10).



Figure 10. (a) Arrosage après semis de la laitue ; (b) plantule de la laitue

- **Analyse des caractéristiques physico-chimiques du sol**

Pour l'analyse des paramètres physico-chimiques du sol, un échantillon composite de 1500 g a été formé par le prélèvement à 6 endroits différents des portions de sol. Les prélèvements ont été effectués à 30 cm de profondeur. Ensuite, l'échantillon prélevé a été acheminé au Service des sols et laboratoire de Junta Agroempresarial Dominicana (JAD) en République Dominicaine. Les analyses ont été réalisées pour les paramètres suivants : pH ; conductivité électrique (CE) ; matière organique (MO) ; carbone organique ; azote total ; phosphore assimilable ; CEC ; teneur en calcium et de magnésium et Texture du sol. Les méthodes suivantes ont été utilisées pour faire les analyses physico chimiques du sol :

- Hanbook 1980, pour la détermination du pH, CE,
- Méthode de Mehlich 3 et Absorption atomique, pour l'extraction des macroéléments (Ca et Mg) et microéléments (Fe, Cu, Zn, Mn, K) ensuite le (Na), le phosphore (P)
- Spectrophotométrie, pour la détermination du (CO, MO)
- Méthode de Bouyoucos pour déterminer la texture du sol

Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques de l'échantillon du sol ont révélé que la parcelle expérimentale a une texture franco-sablonneuse. En effet, il contient respectivement 70,00 % de sable, 23,00 % de limon et 7,00 % d'argile. Il a un pH acide (5,75). Sa conductivité électrique a été évaluée à 213,8 $\mu\text{mhos/cm}$. Sa teneur en matière

organique a été estimée à 2,38 %. Les résultats ont révélé que le sol est plus riche en phosphore (8,66 %) que l'azote (0,12 %) (tableau 3).

Tableau 3. Caractérisation physico-chimique du sol de l'essai expérimental

Caractérisation physico-chimique du sol de l'essai expérimental		
Paramètres	Unité	Quantité
pH		5,75
CE	(μ mhos/cm)	213,8
Matière organique	%	2,38
Phosphore (P)	%	8,66
Azote (N)	%	0,12
Calcium (Ca)	meq/100g	24,03
Magnésium (Mg)	meq/100g	7,66
Potassium (K)	meq/100g	0,02
CEC (meq /100g)	meq/100g	31,7
Saturation de (Na)	%	75,79
Saturation Mg	%	24,16
Saturation K	%	0,05
Argile (A)	%	7
Limon (L)	%	23
Sable	%	70
Texture		Franco-sablonneuse

Source : (Laboratoire sol JAD, 2022) en République Dominicaine

- **Préparation du sol**

Le labourage du sol a été effectué à une profondeur de 30 cm un mois avant le repiquage. A cet effet, une charrue tirée par la traction animale a été utilisée. Ensuite, il a été nivelé. La parcelle a été délimitée par des piquets en bois enfoncés dans le sol et de la ficelle pour faire le contour (figure 11).



Figure 11. (a) Labourage du terrain ; (b) hersage du terrain

- **Mise en place des unités expérimentales**

La mise en place des unités expérimentales a été effectuée une semaine avant la transplantation soit le 22 avril 2022. Douze (12) plates-bandes de 2 m² ont été érigées pour recevoir les plantules (figure 12).

- **Transplantation**

Le repiquage des plantules a été réalisé 22 jours après le semis en pépinière, soit le 29 avril 2022. Deux plants ont été repiqués par poquet. Ensuite, un dégarnissage a été réalisé une semaine après le repiquage.



Figure 12. (a) délimitation du terrain ; (b) tracé des placettes ; (c) (tracé du dispositif expérimental)

- **Entretien des cultures**

En accord avec les conditions climatiques de la région, l'arrosage a été effectuée tous les jours après le repiquage et en fonction des besoins de la culture au cours de son cycle. A cet effet, l'arrosage a été réalisé manuellement avec un arrosoir de 8 L. Pour arroser la parcelle, un total de 32 L d'eau par jour a été appliqué. Le désherbage des parcelles expérimentales a été effectué deux fois durant la période expérimentale, 15 et 30 jours après le repiquage (figure 13).

Pour prévenir l'attaque des parasites, un biocide faites à base de feuilles de neem et de bulbes d'oignons avec une application de 2 litres pour 24 mètre carré a été appliqué deux fois, exclusivement pour la lutte contre les chenilles.



Figure 13. (a) Binage des plants de laitue ; (b) arrosage des plants de laitue

- **Fertilisation**

Trois types de fertilisants ont été utilisés et ont été répartis sur les différentes unités expérimentales. D'après Neuweiler et *al.* (2021) les besoins bruts en azote de la laitue cultivée en plein air est estimé à 100 kg N/ha, soit 10 gr/m². De ce fait, les doses d'éléments fertilisants ont été calculées en fonction du besoin en azote (N) de la laitue. Le résidu de biométhanisation a été titré à 0,15 % N. A cet effet, l'apport de l'effluent de biométhanisation a été faite en raison de 1 L/plant soit 90 L/m² dilué à 10%. Quant au thé de bouse de vache, le résidu a été titré à 0,07 % N, de ce fait 1,5 litres de résidu ont été apportés par plant (1,5 L/plant) soit 121,5 L/m², avec un taux de dilution de 10%. Le Bayfolan forte a été appliqué en raison de 0,01 L/plant soit 0,09 L/ m². Les apports des fertilisants liquides ont été réalisés respectivement le 07,14, 21 et 28 jours après le repiquage.

2.3.3. Analyses des caractéristiques physico-chimiques des effluents

Après 30 jours de fermentation, soit le 04 avril 2022, un échantillon de 500 ml de chaque fertilisant organique liquide a été prélevé et emmené au laboratoire de chimie du JAD (Junta Agroempresarial Dominicana) en République Dominicaine. Les paramètres physico-chimiques suivants ont été mesurés : pH, CE ainsi que le pourcentage de MS, MO, C/N, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Mn, Zn et Fe ont été analysés.

2.3.4. Détermination du taux de dilution du thé de bouse de vache et de l'effluent de biométhanisation

Des études de terrain réalisées au laboratoire de salinité américain a déterminé que la laitue est une espèce modérément sensible à la salinité à 1,3 dS m⁻¹ (Ayers et *al.*, 1951 ; Indoor, 2022). Donc dans le cadre de cet essai, le taux de dilution des deux fertilisants organiques liquides ont été calculé en fonction de la conductivité électrique (CE) de la solution mère et celle requise par la laitue. Un volume d'1 L de résidu de biométhanisation a été dilué à un taux de 10 % soit 1 L de solution concentrée dans 9 L d'eau pour obtenir 90 L/m² de solution nutritive. De même que 1,5 L de résidu de thé de bouse de vache ont été dilués à un taux de 10 % soit 1,5 L de concentré dilués dans 13,5 L d'eau pour obtenir 121,5 L/m² de solution nutritive. Ensuite, la conductivité électrique (CE), le pH et la température de la solution nutritive ont été mesurés à l'aide d'un conductimètre de marque Hanna. Trois répétitions ont été faites pour chaque prélèvement de donnée pendant chaque préparation et chaque apport (figure 14).



Figure 14. (a) Test de CE et du pH de la concentration ; (b) test CE et pH de la solution

2.3.5. Évaluation de l'efficacité des fertilisants sur le taux de survie, les paramètres de croissance et de rendement

- **Taux de survie**

Le taux de survie des plants de laitue a été évalué respectivement 7, 15, 30 et 45 jours après le repiquage. La récolte a été réalisée 60 jours après le repiquage.

Les mesures ont été réalisées pour les paramètres de croissance (Hauteur de la plante et diamètre de la couronne) le 15, 30, 45 et 60 jours après repiquage. Les mesures ont été réalisées sur un échantillon de 9 plantes pour chaque traitement. La hauteur des plantes a été mesurée avec une règle graduée en cm depuis le collet jusqu'au bourgeon terminal (figure 15).



Figure 15. (a) mesures de hauteur des ; (b) mesures du diamètre des laitues

- **Rendement et ses composantes**

La récolte a été réalisée 60 jours après repiquage. Afin de déterminer, le rendement de la laitue, les mesures ont été réalisées sur 9 plantes choisies de manière aléatoire pour chaque traitement. Les organes fraîchement récoltés ont été pesés avec une balance de portée de 10 kg. Le poids moyen des feuilles de laitue en kg a été calculé par plante et par unité de superficie pour chaque traitement. Pour évaluer la biomasse totale, tous les organes des plantes (racines et tiges) sélectionnées ont été récoltés puis ils ont été pesés.



Figure 16. (a) Récolte (b) rendement de la laitue

2.4. Analyses statistiques

Les données collectées sur les paramètres de croissance et du rendement ont été transmises sur une matrice Excel. Elles ont été classées par traitement et ensuite soumises à une analyse de variance (ANOVA) au moyen du logiciel Infostat pour tester le niveau de différences observées à un risque d'erreur de 5%. Quand les différences existent, un test de comparaison a été faite. Le test LSD de Tukey (Least Significant Difference) a été utilisé pour le classement des moyennes (annexe 5).

III. RESULTATS

3.1. Caractéristiques physico-chimiques des fertilisants organiques liquides

Les résultats des caractéristiques physico-chimiques des fertilisants ont montré que pour le thé de bouse de vache, la teneur en macroéléments (NPK) a été respectivement pour l'azote (0,07%), le phosphore (0,07%) et le potassium (0,04%). L'azote et le phosphore ont été les éléments les plus importants comparativement au potassium. En revanche, pour l'effluent de biométhanisation la teneur en macroéléments (NPK) a été respectivement pour l'azote (0,15%), le phosphore (0,27%) et le potassium (0,09%). Le phosphore a été révélé l'élément le plus important. La matière organique a été la plus importante pour l'effluent de biométhanisation (1,35 %) par rapport au thé de bouse de vache (0,98 %). Les pH des deux fertilisants organiques liquides ont été respectivement (5,06) pour le thé de bouse de vache et (6,78) pour l'effluent de biométhanisation. Tous les deux fertilisants organiques liquides ont un pH acide. Par ailleurs, le thé de bouse de vache a été révélé le plus acide. Les conductivités électriques (C.E) ont été respectivement 7,940 ($\mu\text{mhos/cm}$) pour le thé de bouse de vache et 7,020 ($\mu\text{mhos/cm}$) pour l'effluent de biométhanisation (tableau 4).

Tableau 4. Teneur en éléments nutritifs du Thé bouse de vache et de l'effluent utilisées

Paramètres	Thé de Bouse de vache	Effluent de biométhanisation
Azote total (N) %	0,07%	0,15%
Matière organique (%)	0,98	1,35
Carbone organique	0,57	0,78
Phosphore total (P) %	0,07%	0,27%
Potassium total (K+) %	0,04%	0,09%
Manganèse (Mg) %	0,04%	0,07%
pH	5,06	6,78
C.E ($\mu\text{mhos/cm}$)	7.940	7,02

Source : (JAD, 2022)

3.2. Détermination du taux de dilution des biofertilisants

Les volumes de résidus ont été respectivement de 1 L/plante pour l'effluent de biométhanisation et 1,5 L/plante pour le thé de bouse de vache. Les deux fertilisants organiques ont été dilués à un taux de 10 %. Chaque volume de résidu a été dilué respectivement dans (9 L et 8,5 L) d'eau distillée. La conductivité électrique en moyenne a été de 0,90 (mS/cm) pour l'effluent de biométhanisation et 1,27 (mS/cm) pour le thé de bouse de

vache. Le volume de solution fille par plante a été respectivement 90 L/m² pour l'effluent de biométhanisation et 121,5 L/m² pour le thé de bouse de vache (tableau 5).

Tableau 5. Taux de dilution et apport des biofertilisants

Taux de dilution et apport des biofertilisants					
Biofertilisants	Volume de résidu (solution mère) (L/plante)	Taux de dilution (%)	Volume d'eau distillée (L)	C.E moyenne (mS/cm)	Volume de solution fille (L/m ²)
Effluent de biométhanisation	1,00 L	10,00%	9,00 L	0,90 mS/cm	90 L
Thé de bouse de vache	1,50 L	10,00%	13,50 L	1,27 mS/cm	121,5 L

3.3. Taux de survie et Paramètres de croissance

3.3.1. Taux de survie

Les résultats ont montré qu'il n'y a aucune différence significative entre les traitements pendant toutes les périodes d'observation (7 ; 15 ; 30 ;45 et 60 jours après le repiquage). En effet, le taux de survie en moyenne a varié de 98,13 ± 3,23 plantes pour les traitements FB et FC à 100,00 ± 0,00 plantes pour le traitement FC 7 jours après le repiquage. Par ailleurs, il a varié de 94,43±5,50 plantes pour le traitement FT à 98,14 ± 3,20 plantes pour le traitement témoin (T) 15 jours après le repiquage. La plus faite quantité de plante vivante a été observée avec le traitement du thé de bouse de vache (FT). Trente (30) jours après le repiquage, il a varié de 88,86 ± 5,55 plantes pour le traitement FT à 96,30 ± 6,40 plantes pour le traitement FB. Le taux de survie a varié de 88,86 ± 5,55 plantes pour le traitement FT à 96,30 ± 6,40 plantes pour le traitement FB 45 jour après le repiquage. Le taux de survie des plantes a été identique pour ces deux périodes respectives (30 et 45 jours après repiquage). Il a varié de 88,86 ± 5,55 plantes pour le traitement FT à 94,44 ± 5,55 plantes pour le traitement T. Dans l'ensemble, le traitement témoin (T) a donné le meilleur taux de survie tandis que le traitement thé de bouse de vache a donné le taux de survie des plantes le plus faible (tableau 6).

Tableau 6. Effets des fertilisants sur la survie des plantes de Laitue

Taux de survie des plants de laitue					
Traitements	7 jours	15 jours	30 jours	45 jours	60 jours
T	98,14±3,20a	98,14±3,20a	96,29±6,41a	96,29±6,41a	94,44±5,55a
FC	100,00±0,00a	98,13±3,23a	94,43±5,55a	94,43±5,55a	92,56±3,17a
FB	98,13±3,23a	96,30±6,40a	96,30±6,40a	96,30±6,40a	92,57±8,48a
FT	98,13±3,23a	94,43±5,50a	88,86±5,55a	88,86±5,55a	88,86±5,55a
p value ANOVA	0,806	0,752	0,429	0,429	0,72

* Les résultats présentés sont les moyennes \pm leur écart-type. Les lettres différentes dans la même colonne indiquent une différence significative (test de Tukey, $p \leq 0,05$). LSD - différence la moins significative.

Légende : T : témoin ; FC : engrais chimique ; FB : effluent biométhanisation ; FT : thé de bouse de vache

3.3.2. Paramètres de croissance

- **Hauteur des plantes**

La hauteur moyenne des plantes a varié de $4,4 \pm 0,2$ cm pour le traitement d'effluent de biométhanisation (FB) à $4,5 \pm 0,0$ cm pour le traitement de thé de bouse de vache (FT) 7 jours après repiquage. Cependant, pour cette période, les résultats des comparaisons multiples de moyenne avec le test de (test de Tukey, $p \leq 0,05$) ont montré qu'aucune différence significative n'a été observée pour tous les traitements. En revanche, quinze (15) jours après le repiquage, des différences significatives ont été observées entre les traitements. En effet, les résultats ont varié de ($5,5 \pm 0,0$ cm) pour le témoin (T) et ($5,5 \pm 0,1$ cm) pour le traitement thé de bouse de vache (FT) à ($6,2 \pm 0,1$ cm) pour le traitement de fertilisant chimique (FC). Il n'y a pas eu de différences significatives entre FC ($6,2 \pm 0,1$ cm) et FB ($6,1 \pm 0,0$ cm). La hauteur moyenne la plus élevée a été observée avec le traitement chimique. Après trente (30) jours qui ont suivi le repiquage, des différences significatives ont été observées entre les traitements comme il a été le cas pour les 15 jours après le repiquage. En effet, la moyenne la plus faible a été observée avec le traitement témoin (T) ($6,3 \pm 0,4$ cm) et la moyenne la plus élevée a été notée pour le traitement chimique (FC) ($8,7 \pm 0,7$ cm). Les traitements témoin (T) ($6,3 \pm 0,4$ cm) et celui du thé de bouse de vache ($6,6 \pm 0,2$ cm) n'ont pas été significativement différents. De même, le traitement chimique (FC) ($8,7 \pm 0,7$ cm) et celui effluent de biométhanisation (FB) ($8,3 \pm 0,4$ cm) n'ont pas été non plus significativement différents. La même tendance a été observée pour 45 et 60 jours après le repiquage. Toutefois, la hauteur

moyenne a varié de (7,6 ± 0,5 cm) pour le traitement (T) à (12,2 ± 1,0 cm) pour le traitement (FC) dans 45 jours après le repiquage. Soixante (60) jours après le repiquage, elle a varié de (12,8 ± 0,1 cm) pour (T) à (18,3 ± 1,6) cm pour le traitement chimique (FC). A partir du 15 jours jusqu'à 60 jours après le repiquage, les hauteurs moyennes ont été les plus élevées avec le traitement chimique (FC) comparativement aux autres traitements (FB) et (FT) qui ont été deux fertilisants organiques liquides. Par ailleurs, les plus faibles hauteurs moyennes ont été notées avec le traitement témoin (T). Le fertilisant organique liquide issu de l'effluent de biométhanisation (FB) a été révélé plus performant par rapport à celui du thé de bouse de vache (FT) (tableau 7).

Tableau 7. Effets des fertilisants sur la hauteur des plantes de laitue

Hauteur des plants de laitue en cm					
Traitements	Hauteur 7 jours	Hauteur 15 jours	Hauteur 30 jours	Hauteur 45 jours	Hauteur 60 jours
T	4,5±0,1a	5,5±0,0b	6,3±0,4b	7,6±0,5b	12,8±0,1b
FC	4,4±0,3a	6,2±0,1a	8,7±0,7a	12,2±1,0a	18,3±1,6a
FB	4,4±0,2a	6,1±0,0a	8,3±0,4a	11,5±0,6a	17,8±0,7a
FT	4,5±0,0a	5,5±0,1b	6,6±0,2b	8,7±0,1b	13,0±0,0b
p value ANOVA	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0

* Les résultats présentés sont les moyennes ± leur écart-type. Les lettres différentes dans la même colonne indiquent une différence significative (test de Tukey, $p \leq 0,05$). LSD - différence la moins significative.

Légende : T : témoin ; FC : engrais chimique ; FB : effluent biométhanisation ; FT : thé de bouse de vache

• Diamètre moyen

Les résultats ont montré que le diamètre moyen a varié de (5,4 ± 0,2 cm) pour le traitement (FC) à (5,5 ± 0,4 cm) pour le traitement témoin (T) 7 jours après le repiquage. Cependant, aucune différence n'a été observée entre les traitements. Quinze (15) après le repiquage, le diamètre moyen a varié de (7,2 ± 0,6 cm) pour le témoin (T) à (9,0 ± 0,2 cm) pour le traitement fertilisant chimique (FC). Contrairement au 7^{ème} jour après le repiquage, des différences significatives ont été observées au 15^{ème} après le repiquage. Les traitements (T) (7,2 ± 0,6 cm) et (FT) (7,4 ± 0,4 cm) ont été significativement inférieurs aux traitements (FB) (8,9 ± 0,1 cm) et (FC) (9,0 ± 0,2 cm). Cette même tendance a été observée pour (30 jours ; 45 jours et 60 jours) après repiquage, les traitements : témoin (T) et thé de bouse de vache (FT) ont été significativement inférieurs aux traitements : fertilisant chimique (FC) et effluent de biométhanisation (FB). Toutefois, le diamètre moyen a varié de (9,9 ± 0,6 cm) pour le Témoin

(T) à $(14,1 \pm 0,7 \text{ cm})$ pour le traitement chimique (FC), trente (30) jours après repiquage. Quarante-cinq (45) jours après repiquage, il a varié de $(15,0 \pm 0,1 \text{ cm})$ pour le Traitement témoin (T) à $(20,5 \pm 1,2 \text{ cm})$ pour le traitement de fertilisant chimique (FC). Il a varié de $(16,8 \pm 0,4 \text{ cm})$ pour le témoin à $(26,0 \pm 2,9 \text{ cm})$ pour le traitement de fertilisant chimique (FC). Comme il a été observé pour la hauteur de la laitue ; le meilleur résultat a été obtenu avec le traitement de fertilisant chimique (FC) pour le diamètre moyen. Par ailleurs, le plus faible résultat a été obtenu avec le traitement témoin (T) a été révélé. Pour l'ensemble des périodes de mesures, les résultats obtenus avec les traitements de fertilisant chimique (FC) et celui de l'effluent de biométhanisation (FB) n'ont pas été significativement différents. Toutefois, entre les deux fertilisants organiques liquides, le thé de bouse de vache (FT) a été révélé moins performant par rapport à l'effluent de biométhanisation (FB) (tableau 8).

Tableau 8. Effets des fertilisants sur le diamètre de la Laitue (*Lactuca sativa*)

Diamètre des plants de laitues en cm					
Traitements	7 jours	15 jours	30 jours	45 jours	60 jours
T	5,5±0,4a	7,2±0,1b	9,9±0,6b	15,0±0,1b	16,8±0,4b
FC	5,4±0,2a	9,0±0,2a	14,1±0,7a	20,5±1,2a	26,0±2,9a
FB	5,4±0,3a	8,9±0,1a	14,0±0,0a	20,1±1,2a	25,9±2,2a
FT	5,4±0,2a	7,4±0,4b	10,9±0,2b	15,7±1,2b	18,4±1,4b
p value ANOVA	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0

* Les résultats présentés sont les moyennes \pm leur écart-type. Les lettres différentes dans la même colonne indiquent une différence significative (test de Tukey, $p \leq 0,05$). LSD - différence la moins significative.

Légende : T : témoin ; FC : engrais chimique ; FB : effluent biométhanisation ; FT : thé de bouse de vache

- **Poids frais, Biomasse totale et Rendement**

Les résultats ont montré que le poids moyen des organes a varié de $0,47 \pm 0,03 \text{ kg}$ pour le témoin (T) à $1,01 \pm 0,01 \text{ kg}$ pour le traitement de fertilisant chimique (FC). Les traitements (FC) ($1,01 \pm 0,01 \text{ kg}$) et (FB) ($0,95 \pm 0,06 \text{ kg}$) ont été significativement supérieurs aux traitements FT ($0,49 \pm 0,02 \text{ kg}$) et T ($0,47 \pm 0,03 \text{ kg}$). Pour la biomasse totale les différences significatives ont suivi la même tendance entre les traitements. Les traitements (FC) ($0,97 \pm 0,11 \text{ kg}$) et (FB) ($0,95 \pm 0,06 \text{ kg}$) ont été significativement supérieurs aux traitements FT ($0,67 \pm 0,02 \text{ kg}$) et T ($0,65 \pm 0,13 \text{ kg}$). Toutefois, il a été observé que la biomasse totale la plus faible a été obtenue avec le traitement témoin (T) ($0,65 \pm 0,13 \text{ kg}$). Par ailleurs, la biomasse totale la plus élevée a été obtenue avec le traitement de fertilisant chimique (FC)

(0,97 ± 0,11 kg). Le rendement a varié 0,23 ± 0,02 kg/m² pour le traitement témoin (T) à 0,51 ± 0,00 kg/m² pour le traitement de fertilisant chimique (FC). Toutefois, il a été observé que les meilleurs rendements ont été obtenus avec les traitements (FC) (0,51 ± 0,00 kg/m²) et (FB) (0,48 ± 0,03 kg/m²). Parmi les fertilisants organiques liquides, le traitement issu de l'effluent de biométhanisation (FB) (0,48 ± 0,03 kg/m²) a été révélé supérieur par rapport à celui du thé de bouse de vache (FT) (0,24 ± 0,01 kg/m²) (tableau 9).

Tableau 9. Effets des fertilisants sur le poids frais, biomasse totale et rendement de la Laitue (*Lactuca sativa*)

Poids frais, biomasse totale et Rendement			
Traitements	Poids frais des organes en kg	Biomasse totale en kg	Rendement en kg/m ²
T	0,47±0,03b	0,65±0,13b	0,23±0,02b
FC	1,01±0,01a	0,97±0,11a	0,51±0,00a
FB	0,95±0,06a	0,95±0,06a	0,48±0,03a
FT	0,49±0,02b	0,67±0,02b	0,24±0,01b
p value ANOVA	0,0001	0,0044	0,0001

* Les résultats présentés sont les moyennes ± leur écart-type. Les lettres différentes dans la même colonne indiquent une différence significative (test de Tukey, $p \leq 0,05$). LSD - différence la moins significative.

Légende : T : témoin ; FC : engrais chimique ; FB : effluent biométhanisation ; FT : thé de bouse de vache

IV. DISCUSSIONS

Aujourd'hui, le développement durable est au cœur de l'actualité ; la nécessité d'avoir recours à des modes de production agricole durables est très répandue (Avisé, 2021). Par conséquent, les producteurs ont recours à une série de techniques qui contribuent au maintien des écosystèmes, par une gestion durable des ressources naturelles, basée sur le maintien de la productivité du sol et de sa structure, par l'utilisation d'engrais verts, d'engrais organiques bien décomposés (vermicompost, compost naturel, engrais fermentés, fumier de poulet), rotation, association de cultures entre autres (Flores, 2016). Plusieurs auteurs ont affirmé que l'utilisation d'amendements et de fertilisants organiques est une pratique alternative à l'horticulture traditionnelle, qui pourrait améliorer l'état physique et chimique du sol, agissant comme une source de carbone et d'autres nutriments (Albiach *et al.*, 2000 ; Parr et Hornick, 1993 ; Tejada & Gonzalez, 2003). Dans cette étude réalisée sur des fertilisants organiques liquides obtenus par voie de fermentation anaérobique, les résultats de l'analyse des paramètres chimiques (tableau 4) ont montré que le traitement de thé de bouse de vache (FT) a eu une teneur en NPK (0,07 % ; 0,07% et 0,04%). Par ailleurs, la teneur en NPK pour le traitement de l'effluent de biométhanisation (FB) a été respectivement (0,15 % ; 0,27 % et 0,09 %). Ces résultats vont dans le même sens avec ceux de l'essai réalisé par Rotondo *et al.* (2009) il a observé que l'effluent de biométhanisation présente des teneurs en éléments fertilisants (N, P, K) supérieurs à ceux du thé de bouse de vache. Au regard de ces teneurs en éléments majeurs, le fertilisant organique liquide issu de l'effluent de biométhanisation s'est révélé plus intéressant pour la culture de la laitue. D'après Neuweiler *et al.* (2021), l'azote est l'élément nutritif le plus important pour la laitue. A ce propos, Fuentes (1999) mentionne que l'azote (N) est nécessaire à la croissance des plantes, essentiel à la formation de la chlorophylle, de l'activité photosynthétique et des organes végétatifs de la plante, favorise la multiplication cellulaire et stimule la croissance, composant des protéines et d'autres substances protéiques, fait partie des composés qui permettent aux plantes d'exercer leurs fonctions biologiques. Pour ce qui est de la différence observée entre les deux fertilisants organiques, Calvo *et al.* (2014) relatent que celle-ci pourrait être due à la source des matières premières, de la saison de collecte et du procédé d'extraction utilisé.

Les deux fertilisants organiques liquides ont été dilués à 10 %. La dilution a été réalisée en fonction du seuil de tolérance de conductivité électrique (C.E) de la laitue. La laitue est une culture modérément sensible à la salinité, son niveau de tolérance a été évalué à 1,3 mS/cm

(Ayers et *al.*, 1951 ; Indoor, 2022). Le traitement de thé de bouse de vache a été révélé plus salin que celui de l'effluent de biométhanisation (tableaux 4 et 5).

Pendant toute la période de l'essai, les comptages n'ont montré aucune différence significative du taux de survie des laitues en fonction du type de fertilisant. Cependant, le taux de survie des plantes a été le plus élevé pour le témoin et plus faible pour le thé de bouse de vache (tableau 6) 60 jours après le repiquage. Selon Houenou (2019), la mortalité des plantes pourrait s'expliquer par le niveau d'acidité des fertilisants appliqués ($\text{pH} < 6$) (tableau 4).

Quelle que soit la culture, l'évolution des plants dépend grandement du type d'amendement et de fertilisant qu'on lui apporte et aussi de son milieu de développement (Houenou, 2019). Dans cet essai, les résultats sur les paramètres de croissances (hauteur des plantes et diamètre de la couronne) ont révélé que les traitements n'ont pas été significativement différents à partir de 7 jours après repiquage. Cette observation est due en raison de la date d'application des éléments fertilisants qui a eu lieu 7 jours après le repiquage. Celle-ci est soutenue par Sarief (1992), qui affirme que l'engrais organique inséré dans le sol doit être décomposé par les micro-organismes pour que les éléments soient libérés et disponibles pour les plantes. Contrairement au 7^{ème} jour après repiquage, L'apport de l'engrais chimique liquide (Bayfolan) (FC) et de l'effluent de biométhanisation (FB) ont été significativement supérieurs aux traitements thé de bouse de vache (FT) et le témoin (T) (tableaux 7 et 8) pour ces différentes périodes de mesures (15 ; 30 ; 45 et 60) après repiquage.

Les traitements (FC), et (FB), ont développé des diamètres respectifs ($26,0 \pm 2,9$ cm) et ($25,9 \pm 2,2$ cm) plus élevés que le thé de bouse de vache (FT) ($18,4 \pm 1,4$ cm) et le témoin (T) ($16,8 \pm 0,4$ cm). Les résultats de l'essai ont révélé que le traitement de l'effluent de biométhanisation (FB) a été capable de donner des résultats similaires avec le fertilisant chimique (FC). Ces résultats vont dans le même sens avec ceux trouvés par Mohamed et *al.* (2016) dans leur étude sur la substitution partielle et complète d'un engrais chimique par un engrais organique en présence d'un bio-engrais et d'un extrait d'algues. Ils ont trouvé des diamètres respectifs (18,3 cm et 17,8 cm) pour le fertilisant organique à double dose et l'engrais chimique. Les résultats sur les paramètres de croissance (tableaux 7 et 8) ont montré que l'apport du Bayfolan (FB) et l'effluent de biométhanisation (FB) a amélioré de manière significative la croissance des plants de laitue comparé au thé de bouse de vache (FT) et le témoin (T).

Les résultats de l'essai ont montré que les rendements moyens obtenus pour les traitements (FC) et (FB) ont été significativement supérieurs à ceux des traitements (FT) et (T) (tableau 9). L'effluent de biométhanisation (FB) n'a pas été significativement différent du traitement chimique (FB). Par ailleurs, il a été révélé supérieur par rapport au thé de bouse de vache (FT). Cette observation peut être expliquée par la teneur en éléments fertilisants (NPK) de ces principaux fertilisants organiques liquides (tableau 4). Les résultats de la biomasse totale ont suivi la même tendance observée pour le rendement. D'après Ahmad et *al.* (2016), l'accumulation de biomasse dans la production de laitue est le résultat direct de la gestion de la fertilité, qui comprend le type d'engrais, le taux et le moment de l'application. En effet, une fertilité optimale nécessite une synchronisation précise de la biodisponibilité et de la demande des nutriments, en particulier pendant les périodes de croissance rapide (Gaskell et Smith, 2007 ; Treadwell et *al.*, 2007).

V. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les résultats de cette étude ont montré que les fertilisants organiques liquides produits localement à partir des déchets fermentescibles méthanisés (déjections animales et déchets de cuisine) pourraient constituer des sources non négligeables capables d'améliorer la fertilité des sols et de donner des résultats rapprochés par rapport aux fertilisants chimiques. Cette étude a pu mettre en évidence le potentiel que peuvent représenter les fertilisants organiques liquides. Par conséquent, elle se révèle très intéressante dans un contexte d'agriculture durable où l'utilisation des engrais organiques devient de plus en plus importante.

En milieu tropical, les sols sont naturellement acides. L'usage des engrais minéraux accélèrent le processus d'acidification. Au lieu d'augmenter, la productivité des sols diminue donc à long terme.

Les résultats ont montré que le fertilisant de l'effluent de biométhanisation (FB) a été supérieur par rapport au fertilisant de thé de bouse de vache. Ceci a permis de mettre en évidence l'importance de l'azote pour la croissance des légumes feuilles. Même si les engrais chimiques s'avèrent être problématiques dans certaines conditions, leur substitution ne peut pas être réalisée par un fertilisant organique pauvre en éléments nutritifs. Tel a été le cas du fertilisant organique du thé de bouse de vache (FT). Sa teneur en éléments nutritifs a été révélée très faible par rapports à l'effluent de biométhanisation (FB).

Toutefois, les résultats obtenus avec l'effluent de biométhanisation (FB) ont démontré la faisabilité de la production de cultures à cycle court en plein champ avec l'application de l'engrais organique liquide comme source de fertilisants. De tels résultats pourraient ouvrir la voie à l'usage des engrais organiques produits dans la région avec des ressources locales comme une alternative qui pourrait substituer l'engrais de synthèse.

Sur la base des résultats et des conclusions de la recherche, des recommandations peuvent être formulées ainsi :

- Améliorer la qualité et la quantité de matières premières utilisées pour la préparation des engrais organiques liquides en vue d'une augmentation de teneur en éléments chimiques (NPK et Ca, Mg) ;
- Faire des analyses chimiques et bactériologiques plus poussées pour affirmer l'utilisation de l'effluent de biométhanisation comme engrais respectueux des normes de qualité internationales ;

- Il est recommandé de diluer à 1 litre de résidu de biométhanisation 10 fois dans de l'eau pour une croissance et un rendement adéquat des plantes qui ont une conductivité électrique inférieure à 2 mS/cm ;
- Réaliser d'autres essais soit en plein champ ou hors sol afin de pouvoir évaluer l'efficacité de des fertilisants organiques liquides sur différentes catégories de légumes et autres variétés de laitue, dans d'autres régions et si possible dans des périodes différentes.
- D'étudier l'aspect économique de l'application fertilisant organique liquide comparer aux fertilisants chimiques, le temps de travail supplémentaire que requiert la fabrication de ces fertilisants et les bénéfices tirés.

VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdullahi Y. A, Akunna J. C, White N. A, Hallett P. D, Wheatley R. 2008.** Investigating the effects of anaerobic and aerobic posttreatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment. *Bioresour Technol* 99: 8631-8636.
- Albiach, R.; Canet, R.; Pomares, F. & Ingelmo, F. (2000).** Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. *Biores. Technol.* 75 : 43-48
- Albiach, R.; Canet, R.; Pomares, F. & Ingelmo, F. (2000).** Teneur en biomasse microbienne et activités enzymatiques après l'application d'amendements organiques sur un sol horticole. *Biores. Technol.* 75 : 43-48.
- Alburquerque, C. de la Fuente, M. Campoy, L. Carrasco, I. Nájera, C. Baixauli, F. Caravaca, A. Roldán, J. Cegarra, M.P. (2012).** Bernal, Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *European Journal of Agronomy* 43 (2012) 119– 128
- Alzate, J., Loaiza, L. (2008).** Monografía del cultivo de la lechuga. *Colinagro*, 37 p.
- ANSES, 2014.** Relatif à une demande d'appui scientifique et technique concernant les engrais NP issus de lisiers dont les matières premières sont préalablement digérées par méthanisation, candidats à l'inscription au projet de norme NF U 42-001-2 "Engrais Organiques" (Saisine n° 2014-SA-0064), Maisons-Alfort. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). 10 p
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., & Bierman, P. (2006).** Influences of vermicomposts on field strawberries: Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties. *Bioresource Technology*, 97(6), 831–840. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.016>
- Arbon I. M. 2002.** Worldwide use of biomass in power generation and combined heat and power schemes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy* 216: 41–57.

- Assemblée générale du RMT Fertilisation & Environnement –Paris, le 14/15 janvier 2016.** Synthèse de plus de 30 essais depuis 2011- Cultures de Céréales, Maïs, Prairie et Colza - Casdar « caractérisation », et DOSTE VADIM (ADEME)
- Avise, (2021).** Dossier Agriculture durable. Pdf. 46 p. **Bastide G. 2015.** Service Prévention et Gestion des Déchets Direction Consommation Durable et Déchets – ADEME Angers
- BELLAPART, C. (1996).** Agricultura biológica en equilibrio con la agricultura Química editorial AEROS S.A. Barcelona España. Pp. 75-87.
- BENJAMIN, J. (2019).** Effet de trois types de compost et fertilisants chimiques sur la croissance et le rendement de la courgette (*Cucurbita Pepo L.*) dans des sols basaltiques et calcaires à la commune de Kenscoff, Haïti. Gembloux Agro-Bio Tech / Université de Liège. Travail de fin d'études.
- Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. 2009.** Composting of Animal Manures and Chemical Criteria for Compost Maturity Assessment. A Review. *Bioresour Technol* 100: 5444-5453.
- Brady N, Weil RR: Elements of Nature and Properties of Soil: Third Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2010.**
- Brady, N. and Weil, R. (2010).** Nutrient Cycles and Soil Fertility. In: Anthony, V.R., Ed., *Elements of the Nature and Properties of Soils*, 3rd Edition, Pearson Education Inc, Upper Saddle River, NJ, 396-420.
- Brüchert V. 1996.** Degradation of lignin monomers and oligomers by a consortium of anaerobic bacteria. *Microbial Diversity*. Marine Biological Laboratory. The University of Chicago. http://ww.mbl.edu/microbialdiversity/files/2012/08/1996_bruchert.pdf
- BVC, (2009).** Matières fertilisantes et supports de culture utilisables en Agriculture Biologique (Réf: I-302-05-09). Bureau Véritas Certification. 37 p.
- C. Couturier, Solagro, (2014).** La méthanisation rurale, outil des transitions énergétique et agroécologique et K. Möller. (2015). Effects on anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions and soil biological activity. A review. *Agron.Sustain.Dev* 35 : 1021- 1041
- C. Couturier, Solagro. (2014).** La méthanisation rurale, outil des transitions énergétique et agroécologique.

- Calvo, P., Nelson, L., Kloepper, J. W., (2014):** Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383, 3–41.
- Chenon, P., Benbrahim, M., Thevenin, N., 2012.** Cahier des charges pour le choix d'un prestataire (RITMO Agroenvironnement). 25 p.
- CHILON, E. (1997).** Fertilidad de suelos y nutrición de plantas. Ediciones CIDAC. La Paz Bolivia. Pp. 170-185.
- Christelle Mignon Biométhanisation : Utilisation du digestat comme fertilisant en agriculture 18/08/2009** 15 page
- CHURQUINA, (2000),** Apuntes de investigación. Centro de Investigación en Línea Organizada. LA Paz, Bolivia p. 185.
- Cimpa. 2014.** Ficha técnica urea. Disponible en: <http://www.cimpaltda.com/modulo/quimicos/urea.pdf>
- Constant, N., 2011.** Catalogue des engrais et amendements utilisables en viticulture biologique en Languedoc-Roussillon. 37 p.
- Cubero, D. y Veira, M, 1999.** Abonos orgánicos y fertilizantes químicos... ; son compatibles con la agricultura? Disponible en: http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a506907-III_061.pdf
- Cyril Marcihac. (2014).** Étude des conditions de culture d'un écosystème complexe microalgues / bactéries : application au développement d'un procédé d'extraction valorisation des nutriments issus des digestats. Thèse de doctorat en chimie dans le cadre de l'Ecole doctorale Sciences de la matière (Rennes).
- D. Cavalli, M. Corti, D. Baronchelli, L. Belchini, P. Marino Gallina. (2017).** CO2 emissions and mineral nitrogen dynamics following application to soil of undigested liquid cattle manure and digestates. *Geoderma* 308 (2017). 26-35
- D.I. Masse, F. Croteau, L. Masse. (2007).** The fate of crop nutrients during digestion of swine Dabert P, Delagenés J P, Moletta R, Godon J J. 2002. Contribution of molecular microbiology to the study in water pollution removal of microbial community dynamics. *Rev Environ Sci Biotechnol* 1: 39-49.
- De Bok F A M, Plugge C M, Stams A J M. (2004).** Interspecies electron transfer in methanogenic propionate degrading consortia. *Water Res.* 38: 1368-1375.

- Deublein D, Steinhauser A. (2008).** Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 578 pag.
- Diez, T., and M. Krauss. (1997).** Effect of long-term compost application on yield and soil fertility. Wirkung langjähriger Kompostdüngung auf Pflanzenertrag und Bodenfruchtbarkeit. *Agribiological Research* 50 :78-84.
- Dolisca F, Carter DR, McDaniel JM, Shannon DA, Jolly CM: Factors influencing farmers' participation in forestry management programs: a case study from Haiti. Forest Ecol Manage 2006, 236 :324–331**
- Durak, A., Altuntaş, Ö., Kutsal, İ. K., Işık, R., & Karaat, F. E. (2017).** The Effects of Vermicompost on Yield and Some Growth Parameters of Lettuce. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 5(12), 1566. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v5i12.1566-1570.1461>
- Expertise Scientifique Collective sur les Matières Fertilisantes d'Origine Résiduaire (MAFOR). (2014).** Rapport final– Chapitre 3 : Effets agronomiques attendus de l'épandage des Mafor sur les écosystèmes agricoles et forestiers.
- Fertico. (2001).** Características físicas y químicas de fertilizantes granulados. Disponible en : www.fertico.com.mx/indexcomcontent&view=57html.
file:///C:/Users/User/Downloads/FRA183_FR_4_11.PDF
- Forum transfontalier : valorisation des digestats dans les systèmes de culture du Rhin supérieur, LTZ Augustenberg, 18 mai (2017).** Et SPACE, « Les enjeux agronomiques et sanitaires des digestats, 16 septembre 2016. 58 Albuquerque et al. 2012 ; Bachmann et al. 2011, 2014 ; Galvez et al.2012 ; Kautz and Rauber 2007 ; Lošák et al. 2011 ; 2011 ; Ross et al. 1989 ; Schröder et al. 1996 ; Walsh et al. 2012, Clements 2013, Wentzel 2015 ; Odlare et al. 2008, etc.
- Forum transfontalier : valorisation des digestats dans les systèmes de culture du Rhin supérieur, LTZ Augustenberg, 18 mai (2017).** et SPACE, « Les enjeux agronomiques et sanitaires des digestats, 16 septembre 2016 et K. Möller. (2015). Effects on anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions and soil biological activity. A review. *Agron.Sustain.Dev* 35 : 1021-1041
- FREGONI, M. (1986).** Some aspects of epigeal nutrition of grapevines. Edición Alexander. Alemania – Berlín. 205-211 p.

- Frioni L. (2011).** Microbiología: básica, ambiental y agrícola. 1a Ed. Orientación Gráfica Editora. Bs. As. Argentina. 778 pag.
- Garg, V. K., & Gupta, R. (2011).** Optimization of cow dung spiked pre-consumer processing vegetable waste for vermicomposting using *Eisenia fetida*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(1), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.09.015>
- Geert van Vliet et AL (2016),** Une étude exhaustive et stratégique du secteur agricole/rural haïtien et des investissements publics requis pour son développement « Chapitre 7. La problématique foncière en Haïti : Comment questionner les politiques publiques », 38p CIRADBID.
- Geert van Vliet, (2016).** Une étude exhaustive et stratégique du secteur agricole/rural haïtien et des investissements publics requis pour son développement : « Chapitre 14. Gouverner l’agriculture haïtienne autrement ? », 26p
- GEOSOCIETY, (2022).** Plan de Gestion des Déchets Solides (GDS) dans la ville de Ouanaminthe. Rapport d’étude, dans le cadre du projet de Renforcement du système de gestion des déchets solides en Haïti. PNUD. 10 p.
- Gerardi M H. (2003).** The microbiology of anaerobic digesters. Wastewater microbiology series. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- GOMERO, L. (1999).** Manejo ecológico de suelo Primera Edición. Editorial Stefang. SRL.Lima Perú. Pp. 182- 190.
- Gómez-Brandón M, Fernández-Delgado Juarez M, Domínguez J, Insam H. (2013).** Animal Manures: Recycling and Management Technologies. En : Matovic M D Ed. Biomass Now – Cultivation and Utilization. InTec, pag. 237-272.
- Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2014).** Recycling of solid organic wastes through vermicomposting: Microbial community changes throughout the process and use of vermicompost as a soil amendment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(12), 1289– 1312. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763588>
- GONZALES, A. (1999).** Producción de lechuga (*Lactuca sativa*) en campo con y sin quema de vegetación, bajo dosificación con estiércol con la provincia de caranavi La Paz Bolivia. Pp. 38-41.

GUERRERO, J. (2003). Abonos Orgánicos. Tecnología para el manejo ecológico del suelo. Sn: Lima, Perú. Edit. RAAA. pp.90.

Hanafy, A.A.H., J.F. Mishriky and M.K. Khalil, (2000). Reducing nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants by using different biofertilizers. ICEHM2000, Cairo University, Egypt, September, pp: 509- 517.

Hannon DA, Lea JD, Isaac L, Belfort S: Technical Assistance to the Productive Land Use Systems (PLUS) Project: Final Report of the South-East Consortium for International Development (SECID) and Auburn University. Washington, DC: USAID Haiti Economic Growth Office; (2001).

Hosseney, M.H. and M.M. Ahmed. (2009). Effect of nitrogen, organic and bio-fertilization on productivity of lettuce (cv. Dark Greene) in sandy soil under Assiut conditions. Ass. Univ. Bull. Environ. Res., 12(1) : 79-93. [http://: www.avise.org](http://www.avise.org)

<http://encyclopedia.uia.org/en/problem/133176>

<https://agricultureandfoodsecurity.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/2048-7010-211.pdf>.

<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/nv.agr.totl.zs?locations=HT>

<https://www.banquemondiale.org/fr/topic/agriculture/overview#:~:text=Des%20millions%20de%20personnes%20s,10%20%25%20de%20la%20population%20mondiale.>

[https://www.google.com/search?q=CNSA+\(2016\)%2C+1%27insecurite+alimentaire+en+haiti&oq=CNSA+\(2016\)%2C+1%27insecurite+alimentaire+en+haiti&aqs=chrome..69i57j0i546l3.11854j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=CNSA+(2016)%2C+1%27insecurite+alimentaire+en+haiti&oq=CNSA+(2016)%2C+1%27insecurite+alimentaire+en+haiti&aqs=chrome..69i57j0i546l3.11854j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8)

https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/estimat_poptotal_18ans_menag2015.pdf

Hylkema AL: Haiti Soil fertility analysis and crop interpretations for principal crops in the five winner watershed zones of intervention. University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences; (2011). Thesis

IFV, (2010). Fertilisation de la vigne : La réglementation (Fiche technique). Institut Français de la Vigne et du Vin. 7 p.

Insam H, Franke-Whittle I, Goberna M. (2010). Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. En: Insam H, Franke-Whittle I, Goberna M (Eds) Microbes at Work. Springer Berlin Heidelberg, págs 1-34.

- Jeune, W. Comment améliorer la fertilité des sols en Haïti. (2020).** Gainesville, FL, Etats Unis : Fee the Future Haïti. Appui à la Recherche et au Développement Agricole (AREA) Accord de don No. AID-OAA-A-15-00039.
- Jonis, M., (2008).** Intrants destinés aux productions végétales biologiques Quelles exigences réglementaires ? (Cahier technique). Institut Technique de l'Agriculture Biologique.12 p.
- Jordan Meille L., Salduci X., Morel C, Michaud J.Valeur agronomique (C, N,P) de digestats de méthanisation d'origine agricole et agroalimentaire de Dordogne. Projet CASDAR méth@+.com. 13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse Comifer Gemas.2017, 8&9 novembre (2017).** Nantes, France
- K. Möller. (2015).** Effects on anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions and soil biological activity. A review. Agron.Sustain.Dev 35 : 1021-1041
- Knapp B A, Ros M, Insam H. (2010).** Do Composts Affect the Soil Microbial Community? En: Insam H, Franke-Whittle I H, Goberna M, (Eds). Microbes at Work : From Wastes to Resources. Berlin Heidelberg : Springer. pag. 271-291.
- Kothari, R., Verma, S., & Tyagi, V. V. (2016).** Vermicomposting parameters play an effective role in green sustainable approach. (October)
- KOVACS, G. (1986).** The importance of enviromental, plant and spray characteristics for ny foliar nutrition programme to be successful. Edición Alexander.AlemaniaBerlín. 26-43 p.
- L. Jordan Meille (2016).** Évaluation de la valeur fertilisante azotée de digestats de méthanisation. Approche par biotests et test au champ.Projet Casdar meth@+.com
- L.J. Meille. (2016).** Valeur fertilisante azotée des digestats de méthanisation de trois unités de la Dordogne, casdar Meth@+.com
- Lakitan, B. (1996).** Plant Physiology and development of plants. PT Persada Indo-Aryan King of the graphics. Jakarta.
- LAMPKIN, N. (1998).** Agricultura ecológica, una agricultura con futuro. Ediciones Mundi Prensa Madrid España. Pp. 5-7 de 109-117.
- Leclerc, B., Gazeau, G., Bouvard, F., (2012).** Les engrais organiques (Fiche Technique No. 18). 4 p.

LEECE, D.R. (1976). Composition and ultrastructure of leaf cuticles from fruit trees, relative to differential foliar absorption. Australia. 833-847 p.

Lukehurst C T, Forst P, Al Seadi T. (2010). Utilization of digestate from Biogas Plant as Biofertilizer. IEA Bioenergy. Task 37, pag. 22.

Lutz E, Pagiola S, Reiche C: The costs and benefits of soil conservation: the farmer's viewpoint. World Bank Res Observ (1994). 9 :273–295.

M. Leblanc. La prévention des carences en éléments mineurs et secondaires en sol organique. CRAAQ

manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors. Bioresource Technology 98 (2007)

MARNDR, (2021). Plan National d'Investissement Agricole p. 66.

Marthon-Gasquet, S., (2011). L'innocuité dans la mise sur le marché des matières fertilisantes et supports de culture. 9 p.

Michel Benoit-Cattin, (2016). Une étude exhaustive et stratégique du secteur agricole/rural haïtien et des investissements publics requis pour son développement : « Chapitre 1 L'agriculture dans l'économie globale haïtienne »: une vue d'ensemble », 32p, CIRAD BID.

Misra RV, Roy RN, Hiraoka H: On-Farm Composting Methods. Land and Water Discussion Paper 2. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization; (2003)

Möller K, Müller T (2012). Effets de la digestion anaérobie sur le digestat disponibilité des éléments nutritifs et croissance des cultures : un examen. Eng Life Sci 12: 1– 16. Doi :10.1002/elsc.201100085.

Möller K, Müller T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. Eng Life Sci 12: 242-257.

Munroe, G. (2007). Manual of On-Farm Vermicomposting and Vermiculture Organic Agriculture Centre of Canada Acknowledgements EcoAction Program of Environment Canada and New Ground Vermicomposting, Halifax, Nova Scotia. Retrieved from https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/ELearning/Moocs/So_d_Waste/W4/Manual_On_Farm_Vermicomposting_Vermiculture.pdf

- NEPTUNE J.K., PHILIPPE E.C., CRAAN J.A., & ALBERT D. (2010).** Analyse du sous bassin de la rivière Louisa. Rapport préliminaire. Consortium OXFAM QUEBEC/FACN.<https://www.agroforesterie-bassinsversants.ht/Analyse-du-sous-bassin-de-la-Riviere-Louisa>.
- NRCS: General Soils of Haiti. Map. Washington: Natural Resource Conservation Service of the United States Department of Agriculture ; (2010).** <ftp://ftpfc.sc.egov.usda.gov/NH>
- Nyakpa, M.Y., A.M. Lubis, from Mamat, Amrah A.G. and N. Munawar Judges, (1985).** Soil fertility. USAID cooperation with University of Kentucky (WUAE Project).
- Odlare M, Pell M, Svensson K (2008).** Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. Waste Manag 28 :1246–1253. doi :10.1016/j. wasman.2007.06.005
- Osorio, J., Lobo, M. (2003).** Hortalizas. Manual de asistencia técnica No. 28. Instituto Colombiano Agropecuario.
- Paczka, G., Garczynska, Mariola. Mazur-Paczka, Anna. Podolak, Agnieszka. Szura, R., Skoczko, I. and, & Kotecka, J. (2018).** Vermicomposting of Sugar Beet Pulps Using *Eisenia fetida* (Sav.) Earthworms. Annual Set the Environment Protection, 20 (October), 588–601.
- Parr, J.F. & Hornick, S.B. (1993).** Utilization of municipal wastes. En : F.Blaine Metting Jr. (Ed.) Soil Microb. Ecol. p. 545-559.
- Petersen SO, Sommer SG (2011).** Ammoniac et protoxyde d'azote interactions : rôles de la gestion de la matière organique du fumier. Anim Feed Sci Technol 166–167 : 503 513. est-ce que je: 10.1016/j.anifeedsci.2011.04.077
- Ramírez, F. (2011).** Conceptos sobre fertilidad desuelo y fertilizantes. Disponible en : <http://es.scribd.com/doc/57406038/Conceptos-de-Fertilidad-de-Sueloy-Fertilizantes#scribd>.
- REED, D.W. y H.B. TUKEY, Jr. (1978).** Effect of pH on foliar absorption of phosphorus compounds by chrysanthemum. Ediciones Amer. 103 : 337-340p.
- RESTREPO, J. (1998).** La idea y el arte de fabricar los abonos orgánicos fermentados. Aportes y recomendaciones. IICA. Managua Nicaragua. p 73 – 74

- Roy, S., P. Leclerc, F. Auger, G. Soucy, C. Moresoli, L. Cote, D. Potvin, C. Beaulieu, and R. Brzezinski. (1997).** A novel two-phase composting process using shrimp shells as an amendment to partly composted biomass. *Compost Science and Utilization* 5 :52-64.
- Rufino MC, Rowe EC, Delve RJ, Giller KE: Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. *Agric Ecosyst Environ* (2006). 112 :261–282.**
- Ruganzu, V. (2009).** Potentiel d'amélioration de la fertilité des sols acides par l'apport de biomasses végétale naturelle fraîche combinée à du travertin au Rwanda. Thèse de doctorat, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, Gembloux, Belgique, 199p.
- S. Menasseri ; Aubry (UMR INRA/AO sol agronomie et spatialisation). (2016).** SPACE, « Les enjeux agronomiques et sanitaires des digestats », 16 septembre 2016.
- Sarief, S. (1992).** Fertility and cultivation of agricultural land. The Library World. Bandung.
- Smucker GR, Fleurantin G, McGahuey M, Swartley B: Agriculture in a Fragile Environment: Market Incentives for Natural Resource Management in Haiti. Report No 521-000-05-00055-0. Port-au Prince: USAID; 2005.**
- Sukor, A., (2013).** Effects of cyanobacterial fertilizers compared to commonly used organic fertilizers on nitrogen availability, lettuce growth and nitrogen use efficiency on different soil textures. Master thesis Colorado State University, Fort Collins, Colorado, Spring 2013.
- SWIETLIK y FAUST, (1984).** Foliar nutrition of fruit crops. *Ediciones Horticultural reviews.* USA. 287-355p.
- Tejada, M. & Gonzalez, J.L. (2003).** Effets de l'application d'un compost provenant de résidus d'égreneuse de coton broyés sur le rendement du blé en conditions sèches, *Eur. J. Agron.* 19 : 357–368.
- Thierry Giordano, (2016).** Une étude exhaustive et stratégique du secteur agricole/rural haïtien et des investissements publics requis pour son développement « Chapitre 2 Diagnostic global de croissance et implications pour le secteur agricole, », 55p, CIRAD BID
- UNIFA, (2005).** La législation de mise sur le marché. Union des Industries de la Fertilisation. 2 p.
- Valadez, A. (1997).** Producción de hortalizas. México, Noriega Editores, 298 pp.

- Vessey, J. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil.* 255 :571-586.
- VILLEGAS, A. M. (2004).** Evaluación de biofertilizantes foliares en el cultivo de la stevia (*Stevia rebaudina*, Bert). Secretaria de agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. 126 p.
- Voelkner, C. Diercks, R. Horn (2017).** Compared impact of compost and digestate on priming, effect and hydrophobicity of depending on textural composition SOIL discussions.
- Walsh J J, Rousk J; Edwarda-Jones G, Jones D L, Prysor Williams A. (2012).** Fungal and bacteria growth following the application of slurry and anaerobic digestate of livestock manure to temperate pasture soils. *Biol Fertil Soils* 48: 889-897.
- Werner, W., H.W. Sherer, and H.W. Olf. (1988).** Influence of Long-Term Application of Sewage-Sludge and compost from Garbage with sewage-Sludge on soil Fertility Criteria. *Journal of Agronomy and Crop Science* 160 :173-179.
- Zimmerman T: Agroforestry – a last hope for conservation in Haiti? Agroforest Syst (1986).** 4 :255–268

Annexe 1. Résultats des analyses de sol



Resultados de Ensayos de Materiales Orgánicos



Consecutivo: 0194
 Número de Servicio: FQ20220549
 Fecha de Ejecución de los Ensayos: 29/04/2022

ENSAYOS	CODIFICACION DE LAS MUESTRAS				METODO DE ENSAYO	LOD
	1524					
pH	5.06					
Conductividad Eléctrica (µmhos/cm)	7,940.00					
Materia Orgánica (% p/p)	0.98					
Carbono Orgánico (% p/p)	0.57					
Nitrógeno (N) (% p/p)	0.07					
C/N	8.12					
Fósforo (P) (% p/p)	0.07					
Calcio (Ca) (% p/p)	0.55					
Magnesio (Mg) (% p/p)	0.04					
Potasio (K) (% p/p)	0.04					
Cobre (Cu) (% p/p)	< 0.0006					
Manganeso (Mn) (% p/p)	0.00					
Hierro (Fe) (% p/p)	0.02					
Zinc (Zn) (% p/p)	0.00					

CODIGO	DESCRIPCION DE MUESTRAS
1524 Biol.	

OBSERVACIONES:


LAD
 Laboratorio de Análisis de Suelos
 Gerente de Ensayos Fisicoquímicos
 29/04/2022

Página: 2 de 3

Annexe 2. Résultats des analyses chimiques des fertilisants organiques



Resultados de Ensayos de Materiales Orgánicos



Consecutivo: 0194
 Número de Servicio: FQ20220549
 Fecha de Ejecución de los Ensayos: 29/04/2022

ENSAYOS	CODIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS				METODO DE ENSAYO	LOD
	1524					
pH	5.08					
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$)	7,940.00					
Materia Orgánica (% p/p)	0.98					
Carbono Orgánico (% p/p)	0.57					
Nitrógeno (N) (% p/p)	0.07					
C/N	8.72					
Fósforo (P) (% p/p)	0.07					
Calcio (Ca) (% p/p)	0.55					
Magnesio (Mg) (% p/p)	0.04					
Potasio (K) (% p/p)	0.04					
Cobre (Cu) (% p/p)	< 0.0006					
Manganeso (Mn) (% p/p)	0.00					
Hierro (Fe) (% p/p)	0.02					
Zinc (Zn) (% p/p)	0.00					

CODIGO	DESCRIPCION DE MUESTRAS
1524	Biol.

OBSERVACIONES:



 Gerente de Ensayos Físico-Químicos
 Laboratorio de Análisis de Materiales Orgánicos, República Dominicana
 29/04/2022

Página: 2 de 3



Resultados de Ensayos de Materiales Orgánicos



Consecutivo: 0185
Número de Servicio: FQ20220549
Fecha de Ejecución de los Ensayos: 29/04/2022

ENSAYOS	CODIFICACION DE LAS MUESTRAS				METODO DE ENSAYO	LOD
	1525					
pH	6.78					
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$)	7,020.00					
Materia Orgánica (% p/p)	1.35					
Carbono Orgánico (% p/p)	0.78					
Nitrógeno (N) (% p/p)	0.15					
C/N	5.22					
Fósforo (P) (% p/p)	0.27					
Calcio (Ca) (% p/p)	0.46					
Magnesio (Mg) (% p/p)	0.07					
Potasio (K) (% p/p)	0.09					
Cobre (Cu) (% p/p)	< 0.0006					
Manganeso (Mn) (% p/p)	0.00					
Hierro (Fe) (% p/p)	0.08					
Zinc (Zn) (% p/p)	0.00					

CODIGO	DESCRIPCION DE MUESTRAS
1525	Biometanización

OBSERVACIONES:

Gerente de Ensayos Fisicoquímicos
29/04/2022

Página: 7 de 7

FIN DEL INFORME

Annexe 3. Images des activités de terrain

Entretien lors de la conduite de l'essai



Récolte et pesée des laitues



Les fertilisants liquides utilisés comme traitements



Annexe 4. ANOVA

New table_1 : 08-08-22 - 19:13:04 - [Version : 22-07-14]

Analysis of variance

TX7J

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
TX7J	12	0,33	0,00	2,84

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	23,52	5	4,70	0,60	0,7042
Blocs	15,68	2	7,84	1,00	0,4219
Traitements	7,84	3	2,61	0,33	0,8022
Error	47,04	6	7,84		
Total	70,56	11			

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=6,07487

Error: 7,8400 df: 6

Blocs Means n S.E.

B1	100,00	4	1,40	A
B2	98,60	4	1,40	A
B3	97,20	4	1,40	A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=7,91413

Error: 7,8400 df: 6

Traitements Means n S.E.

FC	100,00	3	1,62	A
T	98,13	3	1,62	A
FT	98,13	3	1,62	A
FB	98,13	3	1,62	A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

TX15J

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
TX15J	12	0,45	0,00	4,58

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	95,52	5	19,10	0,97	0,5025
Blocs	67,22	2	33,61	1,71	0,2587
Traitements	28,30	3	9,43	0,48	0,7083
Error	118,04	6	19,67		
Total	213,56	11			

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=9,62322

Error: 19,6735 df: 6

Blocs Means n S.E.

B1	100,00	4	2,22	A
B3	95,84	4	2,22	A
B2	94,43	4	2,22	A

Means with a common letter are not significant different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=12,53679

Error: 19,6735 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
T	98,15	3	2,56 A
FC	98,13	3	2,56 A
FB	96,30	3	2,56 A
FT	94,43	3	2,56 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

TX30J

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
TX30J	12	0,33	0,00	7,10

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	131,88	5	26,38	0,59	0,7087
Blocs	20,54	2	10,27	0,23	0,8007
Traitements	111,35	3	37,12	0,83	0,5222
Error	266,96	6	44,49		
Total	398,84	11			

Test: Tukey Alpha:=0,05 LSD:=14,47189

Error: 44,4931 df: 6

Blocs	Means	n	S.E.
B1	95,83	4	3,34 A
B2	93,05	4	3,34 A
B3	93,05	4	3,34 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alpha:=0,05 LSD:=18,85347

Error: 44,4931 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
FB	96,30	3	3,85 A
T	96,30	3	3,85 A
FC	94,43	3	3,85 A
FT	88,87	3	3,85 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

TX45J

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
TX45J	12	0,33	0,00	7,10

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	131,88	5	26,38	0,59	0,7087
Blocs	20,54	2	10,27	0,23	0,8007
Traitements	111,35	3	37,12	0,83	0,5222
Error	266,96	6	44,49		
Total	398,84	11			

Test: Tukey Alpha:=0,05 LSD:=14,47189

Error: 44,4931 df: 6

Blocs	Means	n	S.E.
B1	95,83	4	3,34 A
B2	93,05	4	3,34 A
B3	93,05	4	3,34 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=18,85347

Error: 44,4931 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
FB	96,30	3	3,85 A
T	96,30	3	3,85 A
FC	94,43	3	3,85 A
FT	88,87	3	3,85 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

TX60J

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
TX60J	12	0,25	0,00	7,02

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	85,50	5	17,10	0,41	0,8276
Blocs	36,28	2	18,14	0,43	0,6670
Traitements	49,22	3	16,41	0,39	0,7634
Error	251,03	6	41,84		
Total	336,53	11			

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=14,03351

Error: 41,8383 df: 6

Blocs	Means	n	S.E.
B1	94,44	4	3,23 A
B2	91,66	4	3,23 A
B3	90,25	4	3,23 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=18,28236

Error: 41,8383 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
T	94,45	3	3,73 A
FB	92,58	3	3,73 A
FC	92,57	3	3,73 A
FT	88,87	3	3,73 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

New table : 08-08-22 - 17:53:08 - [Version : 22-07-14]

Analysis of variance

H7j

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
H7j	12	0,23	0,00	5,44

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	0,11	5	0,02	0,36	0,8611
Blocs	0,03	2	0,02	0,29	0,7602
Traitements	0,07	3	0,02	0,40	0,7562
Error	0,36	6	0,06		
Total	0,46	11			

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=0,52965

Error: 0,0596 df: 6

Blocs	Means	n	S.E.
BlocI	4,56	4	0,12 A
BlocIII	4,48	4	0,12 A
BlocII	4,43	4	0,12 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=0,69001

Error: 0,0596 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
FT	4,58	3	0,14 A
T	4,54	3	0,14 A
FC	4,42	3	0,14 A
FB	4,40	3	0,14 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

H15j

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
H15j	12	0,93	0,87	2,27

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	1,40	5	0,28	15,91	0,0021
Blocs	0,01	2	0,01	0,37	0,7063
Traitements	1,38	3	0,46	26,28	0,0008
Error	0,11	6	0,02		
Total	1,50	11			

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=0,28753

Error: 0,0176 df: 6

Blocs	Means	n	S.E.
BlocII	5,88	4	0,07 A
BlocIII	5,86	4	0,07 A
BlocI	5,80	4	0,07 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=0,37459

Error: 0,0176 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
FC	6,21	3	0,08 A
FB	6,16	3	0,08 A
T	5,51	3	0,08 B
FT	5,51	3	0,08 B

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

H30j

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
H30j	12	0,90	0,82	6,59

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	13,39	5	2,68	10,92	0,0057
Blocs	0,64	2	0,32	1,31	0,3382
Traitements	12,75	3	4,25	17,33	0,0023
Error	1,47	6	0,25		
Total	14,86	11			

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=1,07445

Error: 0,2453 df: 6

Blocs	Means	n	S.E.
BlocIII	7,70	4	0,25 A
BlocII	7,66	4	0,25 A
BlocI	7,19	4	0,25 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=1,39976

Error: 0,2453 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
FC	8,75	3	0,29 A
FB	8,31	3	0,29 A
FT	6,63	3	0,29 B
T	6,37	3	0,29 B

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

H45j

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
H45j	12	0,92	0,86	7,77

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	43,60	5	8,72	14,24	0,0028
Blocs	0,36	2	0,18	0,29	0,7571
Traitements	43,24	3	14,41	23,54	0,0010
Error	3,67	6	0,61		
Total	47,27	11			

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=1,69780

Error: 0,6124 df: 6

Blocs	Means	n	S.E.
BlocIII	10,28	4	0,39 A
BlocII	10,06	4	0,39 A
BlocI	9,86	4	0,39 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test:Tukey Alpha:=0,05 LSD:=2,21183

Error: 0,6124 df: 6

Traitements	Means	n	S.E.
FC	12,25	3	0,45 A
FB	11,55	3	0,45 A
FT	8,80	3	0,45 B
T	7,66	3	0,45 B

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

H60j

Variable	N	R ²	Adj R ²	CV
H60j	12	0,94	0,89	6,00

Analysis of variance table (Sequential SS)

S.V.	SS	df	MS	F	p-value
Model.	81,85	5	16,37	18,81	0,0013
Blocs	1,23	2	0,61	0,71	0,5305
Traitements	80,62	3	26,87	30,88	0,0005
Error	5,22	6	0,87		
Total	87,07	11			

Test: Tukey Alpha:=0,05 LSD:=2,02401

Error: 0,8703 df: 6

Blocs Means n S.E.

BlocIII 15,99 4 0,47 A

BlocII 15,32 4 0,47 A

BlocI 15,31 4 0,47 A

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Test: Tukey Alpha:=0,05 LSD:=2,63680

Error: 0,8703 df: 6

Traitements Means n S.E.

FC 18,39 3 0,54 A

FB 17,85 3 0,54 A

FT 13,08 3 0,54 B

T 12,83 3 0,54 B

Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$)

Annexe 5. Calcul de dilution

Calcul du taux de dilution de l'effluent de biométhanisation

$$100 \text{ g.} \quad \text{-----} \quad > 0,15 \text{ gr N}$$

$$X < \text{-----} \quad 10 / \text{m}^2$$

$$X = 6\,666,67 \text{ gr de résidu}$$

Convertissons 6 666,67 gr en kg = 6,7 kg

Si 1 litre de résidu de biométhanisation est équivalent à 1kg,

Cela => :

$$1 \text{ L} \quad \text{-----} \quad > 1 \text{ kg}$$

$$X \quad \text{-----} \quad 6,67 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow X = \mathbf{6,70 \text{ kg} = 6,70 \cong 7 \text{ L}}$$

Notre densité de plantation est de 9 plants / m²

D'où nous avons apporté :

$$7 \text{ L/m}^2 \Rightarrow 7 \text{ L} / 9 \text{ pl} = \mathbf{0,77 \cong 1 \text{ Litre de résidu par plant}}$$

Nous avons dilué à 10% donc Cela =>

$$1 \text{ L} + 9 \text{ L H}_2\text{O} = \mathbf{10 \text{ L de solution / plant}}$$

D'où

Nous avons 9 plantes par mètre carré

$$\mathbf{10 \text{ L} * 9 = 90 \text{ L} / \text{m}^2}$$

Sachant que nous notre unité expérimentale de 2 m² est constituée de 18 plants

$$\mathbf{10 \text{ L} * 18 = 180 \text{ L} / \text{unité expérimentale}}$$

Fractionnée en 4 apports :

Apport 1 : effectuée 7 jours après le repiquage = **40 Litres ont été apportés**

Apport 2 : effectuée 14 jours après le repiquage = **80 litres**

Apport 3 : 21 jours après le repiquage = **50 litres**

Apport 4 : 28 jours après le repiquage = **10 litres**

Calcul du taux de dilution du thé de bouse de vache

100 g. —————> 0,07 gr N

X ←————— 10 gr / m²

$$\underline{\underline{X = 14, 285, 71 \text{ gr de résidu de thé}}}$$

Convertissons 14, 285, 71 gr en kg = 14,3 kg

Si 1 litre de résidu de biométhanisation est équivalent à 1kg,

Cela =>

1 L —————> 1 kg

X <————— 14,3 kg

$$\underline{\underline{=>X = 14,3 \text{ kg} = 14,3 \text{ L}}}$$

Notre densité de plantation est de 9 plants / m²

D'où nous avons apporté :

$$14,3 \text{ L/m}^2 \Rightarrow 14,3 \text{ L} / 9 \text{ pl} = \mathbf{1,58 \cong 1,5 \text{ Litre de résidu par plant}}$$

Nous avons dilué à 10% donc Cela =>

$$1,5 \text{ L} + 13,5 \text{ L H}_2\text{O} = \underline{\underline{10 \text{ L de solution / plant}}}$$

D'où

Nous avons 9 plantes par mètre carré

$$\underline{\underline{13,5 \text{ L} * 9 = 121,5 \text{ L} / \text{m}^2}}$$

Sachant que nous notre unité expérimentale de 2 m² est constituée de 18 plants

$$\underline{\underline{13,5 \text{ L} * 18 = 243 \text{ L} / \text{unité expérimentale}}}$$

Fractionnée en 4 apports :

Apport 1 : effectuée 7 jours après le repiquage = **50 Litres ont été apportés**

Apport 2 : effectuée 14 jours après le repiquage = **100 litres**

Apport 3 : 21 jours après le repiquage = **70 litres**

Apport 4 : 28 jours après le repiquage = **23 litres**