



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE
UFR AGROFORESTERIE

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union –Discipline Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE : 2024-2025

N° D'ORDRE : 148

CANDIDAT

Nom : OSSEPE

Prénom : YAPI JEAN LOUIS
FERNANDEZ

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale
Spécialité : Biochimie et Technologie des
Aliments

Valorisation du digestat issu du processus de
méthanisation de l'effluent de manioc dans la
production de racines de manioc de haute qualité

JURY

Président : M. BEUGRÉ Grah Avit Maxwell, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KOKO Anauma Casimir, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Rapporteur : M. N'GUESSAN Kouadio Florent, Professeur Titulaire,
Université Nangui ABROGOUA

Rapporteur : Mme COMBO Agnan Marie-Michel Epse KONAN, Maître de
Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. KOUAME N'Guessan, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. EKISSI Elvis Serge Gbocho, Maître de Conférences,
Université Nangui ABROGOUA

Soutenue publiquement
le : 25/07/2025

DEDICACE.....	x
REMERCIEMENTS	xi
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTES DES ANNEXES.....	xxi
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	5
1. GENERALITES SUR LE MANIOC	6
1.1. Origine.....	6
1.2. Systématique.....	6
1.3. Description.....	6
1.4. Variétés et culture du manioc en Côte d’Ivoire.....	8
1.4.1. Variétés et caractéristiques	8
1.4.2. Production et utilisation des tubercules de manioc.....	8
1.4.2.1. Production	8
1.4.2.2. Culture de la plante	8
1.4.3. Mise en place de la culture du manioc en Côte d’Ivoire.....	10
1.4.3.1. Préparation du terrain	10
1.4.3.2. Préparation du matériel végétal.....	10
1.4.3.3. Plantation.....	11
1.4.3.4. Fertilisation et culture du manioc	11
1.5. Valorisation post-récolte du manioc.....	11
1.5.1. Quelques domaines de valorisation du manioc.....	11
1.5.2. Diversité de produits dérivés.....	11
.....	12
1.5.3. Transformation des racines en attiéké	13
1.5.3.1. Origine et définition de l’attiéké	13
1.5.3.2. Valeur nutritive de l’attiéké.....	13
1.5.3.3. Production de l’ <i>attiéké</i>	14
1.5.3.4. Conditionnement de l’attiéké	15
1.6. Composés cyanogéniques et toxicité du manioc	15

1.6.1. Structure des composés cyanogéniques du manioc	15
1.6.2. Biosynthèse et dégradation des glucosides cyanogéniques	15
1.6.3. Toxicité des composés cyanogéniques	16
1.6.4. Pathologies liées aux composés cyanogéniques et traitements.....	17
1.6.5. Méthodes de détoxification du manioc	18
1.7. Principaux constituants du manioc	18
2. GENERALITES SUR LA METHANISATION.....	19
2.1. Procédés de méthanisation.....	19
2.2. Différentes étapes de la méthanisation	20
2.2.1. Hydrolyse	20
2.2.1.1. Hydrolyse des composés glucidiques.....	21
2.2.1.2. Hydrolyse des composés azotés	22
2.2.1.3. Hydrolyse des lipides	22
2.2.2. Acidogenèse	23
2.2.3. Acétogenèse	23
2.2.4. Méthanogenèse	24
2.3. Paramètres de la méthanisation	25
2.3.1. Température	25
2.3.2. Potentiel hydrogène (pH)	25
2.3.3. Homogénéité de substrat.....	26
2.3.4. Concentration de matière organique dans les substrats	26
2.3.5. Composition en nutriments	26
2.3.6. Inhibiteurs de la méthanisation	26
2.4. Types et formes d'alimentation du digesteur	27
2.4.1. Types de digesteurs selon l'état du substrat.	27
2.4.2. Formes d'alimentation du digesteur.....	28
2.5. Produits issus de la méthanisation	28
2.5.1. Biogaz	28
2.5.2. Résidu de digestion : digestat	30
2.6. Importance de la biométhanisation.....	31
2.6.1. Importance économique.....	31
2.6.2. Importance sociale	32
2.6.3. Importance environnementale.....	32

3. GENERALITES SUR LA FERTILISATION	33
3.1. Définition de la fertilisation et types d’engrais	33
3.1.1. Définition de la fertilisation	33
3.1.2. Différents types d’engrais.....	33
3.1.2.1. Engrais minéraux.....	33
3.1.2.2. Engrais organiques	34
3.2. Types de fertilisation	34
3.2.1. Fertilisation organique	34
3.2.2. Fertilisation minérale	35
3.2.3. Fertilisation biologique	35
3.3. Eléments minéraux indispensables à la croissance de la plante	35
3.4. Effets liés à la fertilisation des sols	36
3.4.1. Augmentation des rendements	36
3.4.2. Augmentation des niveaux de carbone	37
3.4.3. Augmentation des gaz à effet de serre	37
3.5. Effets des fertilisants sur les paramètres agronomiques et biochimiques des cultures .	38
3.5.1. Effets des fertilisants sur les paramètres agronomiques	38
3.5.2. Effets des engrais sur la composition chimique du manioc	39
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	38
1. PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE	39
2. MATERIEL.....	41
2. 1. Matériel biologique.....	41
2.2. Matériel fertilisant	43
2.3. Matériel technique	43
3. METHODES	45
3.1. Détermination des valeurs qualitatives du digestat issu d’un digesteur continu des effluents de manioc.....	45
3.1.1. Production du digestat.....	45
3.1.2. Echantillonnage des digestats	45
3.1.3. Analyses physico-chimiques des digestats	45
3.1.3.1. Détermination du pH.....	45
3.1.3.2. Demande chimique en oxygène (NF T90-101, 2021).....	46
3.1.3.3. Demande biochimique en oxygène DBO ₅ (NF EN ISO 5815-1, 2019).....	46

3.1.3.4. Azote total (NF EN 25663, 1994)	47
3.1.3.5. Dosage du Carbone Organique Total (COT)	48
3.1.3.6. Dosage des minéraux	48
3.1.4. Analyses microbiologiques du digestat	48
3.1.4.1. Préparation des milieux de culture et diluants.....	48
3.1.4.1.1. Gélose lactosée biliée au cristal violet et au rouge neutre (VRBL).....	48
3.1.4.1.2. Gélose Baird Parker	49
3.1.4.1.3. Gélose de Mossel.....	49
3.1.4.1.4. Gélose Rapid <i>E. coli</i> 2	49
3.1.4.1.5. Gélose Tryptone-Sulfite-Cycloserine (TSC).....	49
3.1.4.1.6. Gélose Hektoen.....	50
3.1.4.1.7. Gélose Rappaport Vassiliadis	50
3.1.4.1.8. Eau peptonée tamponnée (EPT)	50
3.1.4.2. Préparation des suspensions mères et dilutions successives	50
3.1.4.3. Ensemencement et dénombrement des microorganismes	51
3.1.4.4. Expression des résultats	51
3.1.5. Analyses statistiques	52
3.2. Optimisation du rendement en racines fraîches de manioc par la méthodologie des surfaces de réponse	52
3.2.1. Mise en place des parcelles expérimentales et gestion des opérations sur le terrain	52
3.2.2. Evaluation du rendement en racines de manioc.....	52
3.2.3. Élaboration de la méthodologie des surfaces de réponses : plan composite centré	53
3.2.3.1. Inventaire des variables et réponses	53
3.2.3.2. Identification du domaine expérimental.....	53
3.2.3.3. Etablissement du tableau d'expérimentation.....	54
3.2.3.4. Détermination des coefficients du modèle postulé	55
3.2.3.5. Détermination des paramètres de qualité du modèle.....	55
3.2.3.6. Détermination des conditions optimales d'épandage du digestat	55
3.2.3.7. Tests de contrôle.....	55
3.3. Détermination des effets du digestat issu de méthanisation sur les paramètres agronomiques et physico-chimiques des racines de manioc	56
3.3.1. Dispositif expérimental	56

3.3.2. Préparation des engrais	57
3.3.3. Préparation du matériel végétal.....	57
3.3.4. Mise en culture et suivi	58
3.3.5. Détermination de quelques paramètres agronomiques	59
3.3.5.1. Paramètres agro-morphologiques.....	60
3.3.5.2. Paramètres de production	60
3.3.6. Analyses physico-chimiques des racines de manioc récoltées	61
3.3.6.1. Détermination de l'humidité	61
3.3.6.2. Détermination de la teneur en cendres	61
3.3.6.3. Détermination du pH et de l'acidité titrable.....	62
3.3.6.5. Détermination de la teneur en fibres brutes	62
3.3.6.6. Dosage des sucres totaux.....	63
3.3.6.7. Détermination de la teneur en protéines brutes	63
3.3.6.8. Détermination de la teneur en lipides.....	64
3.3.6.9. Détermination de la teneur en acide cyanhydrique (HCN)	65
3.3.6.10. Détermination de la teneur en glucides totaux	65
3.3.6.11. Détermination de la teneur en amidon	65
3.3.6.12. Détermination de la valeur énergétique	65
3.3.6.13. Dosage des polyphénols totaux	66
3.3.6.14. Dosage des flavonoïdes.....	66
3.3.6.15. Dosage des tanins	67
3.3.6.16. Dosage des éléments traces métalliques (ETM) et autres minéraux (P, K, Ca, Na et Mg)	67
3.3.7. Analyses statistiques	67
3.4. Détermination des effets du digestat d'effluents utilisé dans la culture du manioc sur la qualité de l' <i>attiéké</i>	68
3.4.1. Echantillonnage.....	68
3.4.2. Production de l' <i>attiéké</i>	68
3.4.3. Détermination des paramètres physicochimiques des échantillons d' <i>attiéké</i>	75
3.4.4. Analyse sensorielle des échantillons d' <i>attiéké</i>	75
3.4.4.1. Choix de l'échelle et des appréciations hédoniques.....	76
3.4.4.2. Caractérisation des panélistes ou consommateurs	77
3.4.4.3. Conduite de l'évaluation hédonique.....	77

3.4.5. Traitements statistiques.....	78
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	81
CHAPITRE I : Valeur qualitative du digestat issu d'un digesteur continu des effluents de manioc	82
1. RESULTATS	82
1.1. Composition physicochimique des digestats d'effluents de manioc	82
1.1.1. Composition physicochimique moyenne du digestat	82
1.1.2. Variation de la composition physicochimique du digestat d'une production à l'autre	83
1.2. Composition en minéraux des digestats d'effluents de manioc	83
1.2.1. Teneurs en macroéléments et oligoéléments	83
1.2.2. Variation des teneurs en macroéléments et oligoéléments du digestat d'une production à l'autre	84
1.3. Composition en éléments traces métalliques des digestats d'effluents de manioc.....	85
1.4. Caractéristiques microbiologiques des digestats d'effluent de manioc.....	86
1.5. Différenciation entre les digestats issus de trois productions successives	87
2. DISCUSSION	89
CONCLUSION PARTIELLE.....	92
CHAPITRE II : Optimisation des paramètres d'épandage du digestat dans la culture du manioc par la méthodologie des surfaces de réponse.	93
1. RÉSULTATS	93
1.1. Variation du rendement en racines fraîches de manioc en fonction des doses de digestat d'effluents.....	93
1.2. Modélisation de l'épandage du digestat et qualité du modèle.....	94
1.3. Paramètres optimaux ou stationnaires d'épandage du digestat	96
1.4. Validation du modèle par des tests de contrôle	98
2. DISCUSSION	99
CONCLUSION PARTIELLE.....	101
CHAPITRE III : Effets du digestat issu de méthanisation d'effluents sur les paramètres agronomiques et physico-chimiques du manioc	102
1. RESULTATS	102
1.1. Effets des traitements sur les paramètres agronomiques	102
1.1.1. Paramètres de croissance	102

1.1.2. Paramètres de production.....	105
1.2. Effets des traitements sur les paramètres physico-chimiques des racines récoltées....	106
1.3. Effets des traitements fertilisants sur les composés antioxydants des racines récoltées	109
1.4. Effets des traitements sur la composition en macroéléments des racines récoltées ...	110
1.5. Effets des traitements sur la composition en Eléments Traces Métalliques (ETM) des racines récoltées.....	111
1.6. Visualisation des différences entre les racines de manioc traitées sur la base des paramètres physicochimiques.....	113
2. DISCUSSION	115
CONCLUSION PARTIELLE.....	121
CHAPITRE IV : Effets du digestat d'effluents utilisé dans la culture du manioc sur la qualité de l' <i>attiéké</i> dérivé.....	121
1. RESULTATS	121
1.1. Caractéristiques physicochimiques des échantillons d' <i>attiéké</i>	121
1.2. Teneurs en éléments traces métalliques (ETM) des échantillons d' <i>attiéké</i>	121
1.3. Analyse sensorielle des échantillons d' <i>attiékés</i>	124
1.3.1. Caractéristiques du jury	124
1.3.2. Appréciations des échantillons d' <i>attiéké</i>	125
2. DISCUSSION	126
CONCLUSION PARTIELLE.....	130
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	131
REFERENCES.....	134
ANNEXES	160

DEDICACE

A la famille ACHEGNAN !

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été effectué au laboratoire d'Agro-valorisation de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE de Daloa dans le cadre de l'obtention du Diplôme de Doctorat unique en Agriculture et Foresterie Tropicale. À la fin de cette étude, je tiens à exprimer ma gratitude à l'endroit de ceux dont le soutien, la disponibilité et les contributions à différents niveaux m'ont été précieux.

Je tiens à remercier, Madame ADOHI Krou Viviane, Professeur Titulaire en Physique moléculaire et Spectroscopie électronique, Présidente de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, pour avoir autorisé ma soutenance publique de thèse. Son engagement pour la qualité de la formation et pour le développement de la recherche au sein de cette institution est à saluer.

Je remercie Madame TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Professeur Titulaire en Hydrobiologie et Ex-Présidente de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, pour avoir autorisé mon inscription en Thèse dans cette université. Je vous suis reconnaissant pour votre contribution à ma formation.

J'exprimer ma profonde gratitude à Monsieur SORO Dogniméton, Professeur Titulaire en Agro-pédologie et Vice-président chargé de la Pédagogie, de la Vie Universitaire, de la Recherche et de l'Innovation Technologique à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE. Je vous dis merci d'avoir accordé une attention particulière à ce travail. Vous avez été une source de motivation pour moi. Votre disponibilité, votre rigueur scientifique et surtout la confiance que vous avez placée en moi ont grandement contribué à mener ce travail à terme et dans les meilleures conditions possibles.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur KONE Issiaka, Professeur Titulaire en Sociologie Anthropologie des organisations, Vice-Président en charge de la planification, de la programmation et des relations extérieures de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE. Vous avez grandement contribué à l'amélioration de la formation des étudiants et au développement de la recherche.

J'adresse mes remerciements à Monsieur KOUASSI Kouassi Clément, Maître de Conférences en Microbiologie et Sécurité Alimentaire à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE et Directeur de l'UFR Agroforesterie, pour ses conseils et encouragements à chaque occasion. Je vous dis merci également pour le cadre propice à l'apprentissage que vous avez créé au sein de l'Unité de Formation et de Recherche dont vous avez la charge.

Remerciements

Je remercie Madame TONESSIA Dolou Charlotte, Professeur Titulaire en Physiologie Végétale, Ex-Directrice de l'UFR Agroforesterie, pour ses conseils et encouragements.

Je remercie Monsieur BEUGRÉ Grah Avit Maxwell, Professeur Titulaire en Biochimie-Nutrition et Responsable du laboratoire d'Agro-valorisation de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, pour ses conseils avisés et ses encouragements qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail. Je lui suis également reconnaissant pour les dispositions prises afin d'améliorer les conditions de travail au sein de son laboratoire. Pour cette thèse, je lui adresse mes remerciements les plus sincères pour avoir accepté de présider ce jury et ainsi participer à l'amélioration de la qualité de ce travail.

Je rends hommage et exprime ma profonde gratitude à Feu KONAN Koffi Felix, anciennement Professeur Titulaire à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE et ex-Coordinateur du projet VECDA pour m'avoir intégré à ce projet.

J'adresse mes chaleureux remerciements à Monsieur YAO N'Zué Benjamin, Maître de Conférences en Biochimie et Technologie des Aliments à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, Coordinateur actuel du projet VECDA (Valorisation énergétique des effluents issus des fabriques d'*attiéké* et appui à sa conservation durable) pour avoir guidé mes premiers pas dans la recherche. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour sa disponibilité, ses encouragements, ses critiques constructives, sa rigueur dans le travail et ses suggestions pertinentes qui ont contribué à l'amélioration de la qualité de ce manuscrit. Je suis également reconnaissant pour son soutien moral, financier et matériel. Il est pour moi un père.

J'exprime ma profonde gratitude et mon immense respect à Monsieur KOKO Anauma Casimir, Maître de Conférences en Biochimie et Technologie des Aliments à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, pour avoir accepté d'encadrer cette thèse. Sa rigueur, son dévouement pour le travail bien fait, sa disponibilité et ses précieux conseils ont été extrêmement bénéfiques pour moi. De plus, son souci constant de l'avancement des travaux et son acharnement à les terminer ont été une source de réconfort lors des moments difficiles.

Je tiens à remercier les membres du conseil scientifique de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE qui, malgré leurs nombreuses responsabilités ont contribué à l'amélioration qualitative de cette thèse par leur observation et suggestion. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur N'GUESSAN Kouadio Florent, Professeur Titulaire à l'Université Nangui ABROGOUA, spécialiste en Biotechnologie-Microbiologie, Référé et Rapporteur de cette thèse, pour la qualité de ses analyses, la pertinence de ses remarques et ses suggestions constructives. Son apport a grandement contribué à l'amélioration scientifique de ce travail et à sa recevabilité pour la soutenance publique. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame COMBO Agnan Marie-Michel Epse KONAN, Maître de Conférences à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, spécialiste en Biochimie et Technologie des Aliments, Référé et Rapporteur de cette thèse, pour la rigueur de son évaluation, la finesse de ses observations et la richesse de ses suggestions. Son implication a significativement contribué à la consolidation scientifique de ce travail et à sa validation pour la soutenance publique. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur KOUAME N'Guessan, Maître de Conférences à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, spécialiste en Agrophysiologie, Examineur de cette thèse, pour le temps qu'il a consacré à l'analyse de ce travail, ainsi que pour la pertinence de ses observations et suggestions. Je lui suis reconnaissant pour sa participation à l'évaluation de cette recherche dans le cadre de la soutenance publique. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie Monsieur EKISSI Elvis Serge Gbocho, Maître de Conférences à l'Université Nangui ABROGOUA, spécialiste en Biochimie-Nutrition, Examineur de cette thèse, pour l'attention qu'il a portée à ce travail ainsi que pour les remarques et suggestions formulées. Sa contribution à l'évaluation de cette recherche dans le cadre de la soutenance publique ma été particulièrement précieuse.

J'adresse mes remerciements aux Enseignants-Chercheurs et Chercheurs du Département de Biochimie et Microbiologie de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE pour les conseils avisés et autres orientations qui ont été bénéfiques pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mon respect à l'endroit des Enseignants-Chercheurs du projet VECDA pour leur soutien et disponibilité, sans oublier les pertinentes remarques formulées dans le sens de l'amélioration de la qualité du manuscrit.

Mes remerciements vont également à Monsieur AKMEL Djedjro Clément, Docteur Ingénieur, Maître de Conférences à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

Remerciements

(INP-HB), pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et son appui tout au long de la réalisation de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à M. KORBEOGO Mohamadi, chargé de l'installation du digesteur dans le cadre du projet VECDA, ainsi qu'à mon oncle, M. AKUIE Awo Sylvestre, pour leurs précieux conseils et leur soutien.

Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance à la famille EKRA pour les conseils et bénédictions.

Je tiens à remercier Messieurs BOKO K., DIOMANDE V., KOFFI Dramane, EHUI Edi, KOUASSI Hugué M., SORO Chigata L. et YACOUBA A., Docteurs, pour leur présence et leur soutien inestimable tant dans les moments de joie que dans les épreuves rencontrées.

J'adresse également mes remerciements à Messieurs GBOUAZO Ybo et N'GBADJO T.V., doctorants, pour leur précieuse collaboration, leurs conseils avisés et leur esprit de partage qui ont largement contribué à enrichir cette expérience. Leur soutien m'a été d'un grand apport, tant sur le plan académique que personnel.

Mes sincères remerciements vont à AKPALE A., ATTOUNGBRE K., KAMONOU Dominique, KARABOUALY M., KOBİ Obouo H., KOFFI Fabrice, KOFFI S., KONE Kinaglan L., LOUA Pele, MIANO J-B., N'ZIAN Tehoua M., NACANABO Rasmane, OURAHIO Prégnon S., SAYE L., TAPE Zomassa F. et TAYORO J., leur amitié, leurs encouragements et leur disponibilité ont été d'un grand soutien tout au long de cette étape importante. Je leur suis profondément reconnaissant pour leur présence et leurs précieux conseils.

Liste des sigles et abréviations

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP	: Analyse en composantes principales
ADEME	: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFNOR	: Association Française de Normalisation
AGV	: Acides gras volatils
ANOVA	: Analyse de variance
AOAC	: Association officielle des chimistes analystes
ASR	: Anaérobies sulfito-réducteurs
BSR	: Bactéries sulfato-réductrices
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique de Côte d'Ivoire
CODINORM	: Association Ivoirienne de normalisation
COT	: Carbone organique total
C	: Carbone
C/N	: Rapport carbone-azote
DBO	: Demande biochimique en oxygène
DBO ₅	: Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours
DCO	: Demande Chimique en Oxygène
DO ₅₀₀	: Densité optique lue au spectrophotomètre à 500 nm
EPT	: Eau Peptonée Tamponnée
ETM	: Eléments traces métalliques
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FAOSTAT	: Base de données statistique de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	: Gaz à effet de serre
HCN	: Acide cyanhydrique
HNL	: Hydroxynitrile lyase
IITA	: Institut International d'Agriculture Tropicale
ISO	: Organisation Internationale de Normalisation
MF	: Matière fraîche
MO	: Matière organique
MS	: Matière sèche
NF	: Norme française

Liste des sigles et abréviations

NTK	: Azote total Kjeldahl
NPK	: Azote, Phosphore et Potassium
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PCI	: Pouvoir Calorifique Inférieur
RDC	: République Démocratique du Congo
TSDU	: Toilettes sèches à déviation d'urine
TSP	: Triple superphosphate
TRH	: Temps de Rétention Hydrique
UFC	: Unité Formant Colonies
US	: United States (États-Unis)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Quelques variétés de manioc cultivées en Côte d’Ivoire et leurs caractéristiques . 9

Tableau II : Variabilité de la composition chimique de la racine de manioc selon les sources 19

Tableau III : Composition générale d’un biogaz 29

Tableau IV : Equivalence entre le biogaz brut et d’autres sources d’énergie 29

Tableau V : Caractéristiques physico-chimiques de sols du site d’étude 41

Tableau VI : Valeurs des différents niveaux de facteurs 53

Tableau VII : Tableau d’expérimentation..... 54

Tableau VIII : Echelle hédonique à 9 points 76

Tableau IX : Définition des appréciations hédoniques choisies pour l’analyse sensorielle ... 77

Tableau X : Composition physicochimique moyenne du digestat d’effluents de manioc..... 82

Tableau XI : Composition physicochimique des digestats d’effluents de manioc issus de trois productions successives..... 83

Tableau XII : Teneurs moyenne en macro et oligoéléments du digestat d’effluent de manioc 84

Tableau XIII : Composition en macroéléments et oligoéléments des digestats d’effluent de manioc issus de trois productions successives 85

Tableau XIV : Composition en éléments traces métalliques des digestats d’effluents de manioc issus de trois productions successives 86

Tableau XV : Charges microbiennes des digestats d’effluents de manioc 87

Tableau XVI : Rendements en racines fraîches de la variété Yacé récoltée 12 mois après plantation en fonction des différents dosages de digestat d’effluent de manioc 93

Tableau XVII : Significativité de l’analyse de variance pour le modèle postulé..... 94

Tableau XVIII : Coefficients du modèle de surfaces de réponses et effets des facteurs sur le rendement en racines fraîches de manioc 95

Tableau XIX : Quelques critères statistiques de qualité du modèle 96

Tableau XX : Résultats des tests de contrôle sous les conditions optimales d'application du digestat d’effluent de manioc. 98

Tableau XXI : Evolution du nombre de feuilles de manioc dans le temps en fonction des traitements 103

Tableau XXII : Accroissements en hauteur des plants de manioc dans le temps et en fonction des traitements..... 105

Liste des tableaux

Tableau XXIII : Valeurs des paramètres de production des racines de manioc en fonction des traitements	106
Tableau XXIV : Composition physicochimique des racines de manioc après 12 mois de culture en fonction des traitements effectués	108
Tableau XXV : Composition en antioxydants des racines de manioc récoltées à 12 mois en fonction des traitements effectués	109
Tableau XXVI : Composition en macroéléments des racines de manioc récoltées à 12 mois en fonction des traitements effectués	110
Tableau XXVII : Composition en Eléments Traces Métalliques (ETM) des racines de manioc récoltées à 12 mois en fonction des traitements	112
Tableau XXVIII : Paramètres physicochimiques des deux échantillons d'attiéké issus des racines traitées avec le digestat et des racines témoins	122
Tableau XXIX : Composition en éléments traces métalliques (ETM) des échantillons d' <i>attiéké</i> issus des racines traitées avec le digestat et des racines témoins	123
Tableau XXX : Caractéristiques démographiques des consommateurs d'attiéké formant le jury	124
Tableau XXXI : Résultats du test d'indépendance de Khi- deux entre les variables caractérisant les panelistes et les appréciations hédoniques évaluées au niveau des échantillons d'attiéké produit	124
Tableau XXXII : Notes attribuées par le jury aux différentes appréciations hédoniques des échantillons d'attiéké produits.....	125

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Champ de manioc	7
Figure 2 : Boutures de manioc	10
Figure 3 : Transformation artisanale du manioc	12
Figure 4 : Diagramme de production d’attiéké	14
Figure 5 : Structure chimique de la linamarine et de la lotaustraline	15
Figure 6 : Hydrolyse enzymatique de la linamarine	16
Figure 7 : Schéma des étapes de la méthanisation	21
Figure 8 : Types d’engrais (a : Minéraux ; b : Organiques).....	34
Figure 9 : Nutrition de la plante	36
Figure 10 : Présentation du site d’étude.....	39
Figure 11 : Diagrammes ombrothermiques de la région de Daloa de 2020 à 2023	40
Figure 12 : Echantillons de digestats	42
Figure 13 : Boutures de manioc de la variété Yacé pour la culture	42
Figure 14 : Racines fraîches de manioc.....	43
Figure 15 : Digesteur en construction	44
Figure 16 : Différents compartiments du digesteur incluant les fosses de stockage du digestat en fin de construction	44
Figure 17 : Dispositif expérimental.....	56
Figure 18 : Boutures de manioc de la variété Yacé pour la culture	58
Figure 19 : Vue de l’essai après la mise en place des buttes	59
Figure 20 : Vue de l’essai après 3 mois	59
Figure 21 : Echantillon de racines de manioc de la variété Yace récolté après 12 mois de plantation.....	68
Figure 22 : Manioc prêt pour broyage avec des sachets contenant des ferments.....	69
Figure 23 : Ensachage de la pâte de manioc	70
Figure 24 : Pâte de manioc emballée en cours de fermentation	70
Figure 25 : Pressage de la pâte de manioc.....	71
Figure 26 : Emiettage de la pâte de manioc pressée.....	71
Figure 27 : Formation des granules d’attiéké.....	72
Figure 28 : Tamisage- calibrage des granules d’attiéké.....	73
Figure 29 : Opération de vannage de la semoule de manioc.....	74
Figure 30 : Cuisson de l’attiéké.....	75

Liste des figures

Figure 31 : Cercle de corrélation entre les variables caractérisant les digestats produits par ACP	88
Figure 32 : Représentation des productions de digestat par ACP dans le plan F1 x F2.....	88
Figure 33 : Normalité des résidus du modèle.....	95
Figure 34 : Représentation des résidus en fonction des valeurs prédites par le modèle	96
Figure 35 : Courbes d'isoréponses pour le rendement en racines fraîches de manioc en fonction du volume et de la concentration du digestat d'effluent utilisé.....	97
Figure 36 : Effet du volume et de la concentration du digestat d'effluent de manioc sur le rendement en racines de manioc	97
Figure 37 : Evolution du diamètre au collet de la tige de manioc en fonction des traitements	103
Figure 38 : Evolution de la hauteur des plants de manioc pendant la durée de l'expérimentation	104
Figure 39 : Cercle de corrélation des variables caractérisant les échantillons de manioc issus de différents traitements par ACP	113
Figure 40 : Représentation des échantillons des racines de manioc issues des différents traitements dans le plan F1 x F2 par ACP	114

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1 : Matériel technique

Annexe 2 : Attiékés produits avec des racines traitées au digestat (a) et avec des racines non traitées (b)

Annexe 3 : Mise en place du digesteur

Annexe 4 : Fiche d'évaluation sensorielle des échantillons d'attiéké

INTRODUCTION

Le manioc (*Manihot esculenta* Crantz), plante de la famille des Euphorbiacées est originaire d'Amazonie (Amérique du Sud). Aujourd'hui, sa culture s'est amplement étendue aux régions tropicales et subtropicales (Nouar *et al.*, 2013). Il fait partie des principales plantes à racines cultivées dans le monde avec une production mondiale estimée à 330,4 millions de tonnes en 2022 dont 63,14 % en Afrique (FAOSTAT, 2022). Les racines tubéreuses du manioc sont des aliments essentiellement énergétiques riches en amidon, peu encombrés en glucides non digestibles. Elles sont consommées sous forme de bouillies, frites ou même crues pour les variétés douces, après rouissage pour les variétés amères. La transformation de la racine du manioc améliore sa capacité à être digérée, son attrait, la stabilité des produits dérivés, prolonge leur durée de conservation et contribue à diminuer leur taux de composés cyanogéniques (Krabi *et al.*, 2015). La racine de manioc est transformée en *placali* (Koko, 2012), en *gari* (James *et al.*, 2013), en *attoukpou* (Nevry *et al.*, 2007) et particulièrement en *attiéké* (Assanvo *et al.*, 2002). Les produits de transformation comme les pâtes, féculés et farines sont stables et commercialisables (Raffaillac, 1997).

En Côte d'Ivoire, l'*attiéké* est la principale forme d'utilisation alimentaire des racines tubéreuses de manioc (Kacou, 2000). Couramment désigné sous le nom de couscous de manioc, il s'agit d'une semoule qui est cuite à la vapeur avant d'être consommée. Au cours de sa préparation, les productrices emploient un ferment traditionnel qui sert de source de microorganismes pour la fermentation de la pâte obtenue des racines de manioc fraîches (Assanvo *et al.*, 2006). L'*attiéké* représente la principale source d'activité génératrice de revenus dans la région côtière d'Abidjan, reconnue grande productrice et consommatrice (Akely, 2012). Cependant, la production d'*attiéké* à partir des racines de manioc génère des déchets solides et liquides. Les sous-produits liquides (effluents) sont riches en matière organique et présentent une grande toxicité en raison de leur haute concentration en cyanure (Asiedu, 1991 ; Ihedioha, 2002 ; Colin *et al.*, 2007 ; Ubalua, 2007). Ces effluents constituent une source importante de pollution. Dès lors, il apparaît essentiel de les dépolluer. La méthanisation constituerait une alternative technologique intéressante (Kpata-Konan *et al.*, 2011). Ce procédé permet de convertir, en l'absence d'oxygène, la matière organique en énergie grâce aux bactéries méthanogènes (Kalloum *et al.*, 2007).

La méthanisation est un processus de décomposition de la matière organique conduisant à la formation de deux produits valorisables : le biogaz et le digestat (Doublet *et al.*, 2004 ; Kpata-Konan *et al.*, 2011). Concernant le digestat, résidu liquide issu de la méthanisation, sa gestion efficace constitue un problème majeur pour les unités de méthanisation. En effet, les grandes quantités produites de digestats peuvent conduire à un bilan environnemental et

économique négatif pour l'unité de méthanisation (Tremier *et al.*, 2014). C'est pourquoi, il s'avère indispensable de mettre en place des systèmes de valorisation des digestats.

Parmi les procédés de valorisation, l'épandage des digestats au champ apparaît comme une alternative crédible. Cependant, les effets du digestat sur le rendement des cultures varieraient selon le type de digestat, la nature des cultures et les propriétés du sol (Tremier *et al.*, 2014). Pour une meilleure utilisation des digestats en agriculture, leur caractérisation tant physicochimique que microbiologique s'impose. Par ailleurs, il est admis que la qualité physicochimique du digestat dépend largement de la qualité des intrants utilisés durant la méthanisation (Doublet *et al.*, 2004). Parmi ces intrants, figurent les effluents issus des fabriques d'*attiéké* comme l'ont rapporté Kpata-Konan *et al.* (2019). Dans leur étude, ces auteurs ont eu recours à un digesteur discontinu dans lequel les différents intrants ont été renouvelés à chaque production. Selon Kalloum *et al.* (2011), le digestat obtenu est stable, inodore, largement débarrassé des germes pathogènes et peut être utilisé comme amendement pour les sols agricoles. En effet, le digestat liquide issu de la méthanisation des effluents de manioc pourrait constituer une alternative viable aux engrais commerciaux. Il a été efficacement utilisé dans la culture de haricots verts et de concombres en Côte d'Ivoire, augmentant les rendements respectivement de 11 % et 13 % (Nitidae, 2020). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un dosage de 50 %.

Par ailleurs, l'aspect des digestats issus de la méthanisation des effluents de manioc dans un digesteur continu n'a pas encore été abordé. Pourtant pour une utilisation efficiente de ce type de digestat, il est essentiel de le caractériser et de déterminer les conditions optimales pour leur épandage. Aussi, dans le cadre de la culture du manioc, quels dosages du digestat pourraient conduire aux meilleurs rendements en racines fraîches ? L'aptitude à la transformation des racines obtenues en *attiékés* serait-elle influencée par le digestat ? La valorisation agronomique des digestats pose donc des questions importantes au monde agricole. En outre, ces matières sont assez peu référencées, y compris au niveau international et leur utilisation fait encore l'objet d'études destinées à tester leur intérêt agronomique (Jordan-Meille *et al.*, 2017).

Le présent travail a pour objectif général de valoriser le digestat de manioc produit avec un procédé de méthanisation en fonctionnement continu dans la production de manioc de haute qualité nutritionnelle, technologique et organoleptique.

Les objectifs spécifiques visés sont :

Introduction

- ✓ déterminer les valeurs qualitatives du digestat issu d'un digesteur continu des effluents de manioc ;
- ✓ optimiser les paramètres d'épandage du digestat utilisé dans la culture du manioc par la méthodologie des surfaces de réponse ;
- ✓ déterminer les effets du digestat issu de la méthanisation d'effluents sur les paramètres agronomiques et physico-chimiques des racines de manioc ;
- ✓ déterminer l'influence du digestat d'effluents utilisé dans la culture du manioc sur la qualité de l'*attiéké* produit.

En plus de l'introduction, le présent document est subdivisé en trois parties. La première traite des généralités relatives au manioc, à la méthanisation et à la fertilisation. La deuxième partie décrit le matériel et les méthodes employés pour atteindre les différents objectifs. La troisième partie présente les résultats, qui sont ensuite discutés. Enfin le document s'achève par une conclusion générale, suivie de perspectives de recherche et des listes de références et d'annexes.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

1. GENERALITES SUR LE MANIOC

1.1. Origine

Originaire d'Amérique, le manioc fut introduit en Afrique vers le XVI^e siècle (Memento de l'agronome, 2023). Il s'est rapidement développé dans le centre de l'Afrique. Actuellement, il est cultivé dans toutes les régions chaudes du globe et les principaux pays centres de culture en Afrique sont le Nigeria, la République Démocratique du Congo (RDC) et la Tanzanie (FAOSTAT, 2022). Aujourd'hui, le manioc fait partie intégrante du régime alimentaire de plus d'un demi-milliard d'êtres humains.

1.2. Systématique

Le manioc est une dicotylédone de la famille des Euphorbiacées (Asiedu, 1991). Sa position systématique se présente comme suit :

Règne	: Plantae
Division	: Magnoliophyta
Classe	: Magnoliopsida
Ordre	: Euphorbiales
Famille	: Euphorbiaceae
Genre	: <i>Manihot</i>

Espèce : *Manihot esculenta* Crantz

La famille des Euphorbiacées comprend près de 300 genres avec 8 000 espèces issues, pour la plupart, des zones tropicales. Cette famille renferme le genre *Manihot* composé de plus de 200 espèces. Sur le plan agronomique, l'espèce la plus importante est le manioc, *Manihot esculenta* Crantz, synonyme de *Manihot utilissima* Pohl (Rogers & Appan, 1973).

1.3. Description

Le manioc est l'une des cultures vivrières les plus significatives de la zone tropicale humide, en raison de sa productivité et de son adaptation à différents types de sols et de climats (Memento de l'agronome, 2023). Plante ligneuse et à latex blanc, le manioc peut atteindre une hauteur de trois mètres, avec des feuilles digitilobées alternes. Sa racine se développe dans le sol en absorbant des nutriments, ce qui la rend charnue et riche en substances actives. Cette

partie de la plante, appelée tubercule dans certaines régions (Afrique de l'Ouest), est largement utilisée.

Le manioc est cultivé dans l'ensemble de la zone intertropicale, où les régimes de prélèvement se caractérisent par une ou deux saisons des pluies, avec des pluviométries annuelles allant de 600 mm à plus de 4 000 mm. La température minimale requise pour sa culture est de 12 °C, tandis que la température optimale pour la croissance se situe entre 25 et 29 °C (Memento de l'agronome, 2023). Le manioc est principalement cultivé pour ses racines tubéreuses, qui constituent la partie la plus consommée de la plante. Toutefois, les feuilles sont également comestibles et représentent une source nutritionnelle non négligeable. La quantité d'amertume dans chaque variété dépend de la présence d'acide cyanhydrique, elle-même largement influencée par les conditions climatiques (Fortin *et al.*, 1998). En effet, Les stress climatiques tels que la chaleur, la sécheresse ou un ensoleillement intense peuvent entraîner une élévation du taux d'acide cyanhydrique chez les plantes sensibles, en stimulant la synthèse de composés cyanogéniques (Chaouali, 2013). Plusieurs descripteurs sont utilisés pour la caractérisation des clones de manioc. En Côte d'Ivoire, en plus de la couleur du phelloderme (rouge ou blanc), certains clones sont désignés par le nom d'une localité (Bonoua, Bingerville) ou par le nom de la personne qui a introduit le cultivar dans la zone. C'est ainsi qu'on parlera de « Es Akpel », « Yacé », « Céline » (Zoundjhekon, 1986). Le manioc a également plusieurs noms vernaculaires : « cassava » en anglais, « yuca », « mandioca » en espagnol et en portugais, « agba » en baoulé en Côte d'Ivoire. La figure 1 illustre un champ de manioc.



Figure 1 : Champ de manioc (Anonyme 1, 2025)

1.4. Variétés et culture du manioc en Côte d'Ivoire

1.4.1. Variétés et caractéristiques

Les variétés culturales de manioc comprennent des variétés traditionnelles et des variétés améliorées. En Côte d'Ivoire, plusieurs variétés améliorées de manioc sont vulgarisées, parmi lesquelles figurent le Yacé, Bonoua, IM84, IM89, IM93, TMS 4(2)1425, TMS 30572, Bocou 1 et Yavo (Tableau I).

1.4.2. Production et utilisation des tubercules de manioc

1.4.2.1. Production

Le manioc se classe comme la quatrième culture végétale en termes de contribution à l'alimentation mondiale, avec une production de 330 408 754 tonnes, derrière le riz (776 461 457 t), le blé (808 441 568 t) et le maïs (1 163 497 383 t) (FAOSTAT, 2022). Il est cultivé et consommé sur plusieurs continents, à l'exception de l'Europe. Cependant, son importance économique et alimentaire varie considérablement d'une région à l'autre. L'Afrique fournit plus de 63,14 % de la production mondiale avec le Nigéria, un des plus gros producteurs (60,8 millions de tonnes). Il est suivi de la RDC (48,7 millions de tonnes). La Côte d'Ivoire n'a produit que 6,3 millions de tonnes en 2022 (FAOSTAT, 2022). La majeure partie de la production d'Amérique du Sud et d'Asie est exportée, tandis qu'en Afrique, elle est principalement consommée localement. En raison de l'intérêt croissant qui lui est accordé comme culture d'exportation, il existe de plus en plus de recherches sur le manioc (Djoulede, 2005).

1.4.2.2. Culture de la plante

En Afrique, la culture de manioc se fait surtout en zone forestière, mais les pratiques culturales en forêt ou savane sont presque identiques. Pour la culture, le sol ne nécessite pas assez de préparation et est parfois, défriché par brûlis. Quant à la multiplication, elle se fait par bouturage. L'entretien du manioc est simple et nécessite seulement deux à trois sarclages (Djoulede, 2005). En outre, cette plante demande peu d'engrais et peut être associée à d'autres cultures telles que le maïs, l'arachide ou le sésame. Elle est cultivée durant la saison des pluies et prospère même dans des sols de qualité médiocre (Memento de l'agronome, 2023). Le manioc offre un rendement constant, résiste aux conditions climatiques extrêmes (il supporte les fortes pluies et est très tolérant à la sécheresse), et montre une faible sensibilité aux maladies et aux attaques d'insectes. La récolte annuelle n'est pas obligatoire. En effet, les tubercules peuvent être conservés dans le sol plusieurs mois (Trèche, 1995).

Généralités

Tableau I : Quelques variétés de manioc cultivées en Côte d'Ivoire et leurs caractéristiques (Akpingny & Koulou, 2017)

Variétés	Cycle (mois)	Zone de production	Rendement (t/ha)	Caractéristiques	Goût	Usage courant
Yacé	11-20	Sud, Centre	20	Taux de matière sèche élevé (40 %), sensible à la mosaïque, aux acariens et aux cochenilles, bon pour <i>attiéké</i> .	Amer	<i>Attiéké</i> , placali
Bonoua	12-20	Répandue	15	Taux de matière sèche élevé (39 %), sensibilité à la mosaïque et aux cochenilles, rendement faible, bonne cuisson et bon goût.	Doux	Foutou
IM 84	12-20	Répandue	30	Rendement élevé, récolte facile, goût doux, bon pour <i>attiéké</i> , bonne adaptation au sol, sensibilité à la mosaïque.	Doux	<i>Attiéké</i> , Foutou
IM 89	12-20	Répandue	28	Taux de matière sèche élevé (39 %), sensibilité aux acariens, bonne cuisson, bon pour <i>attiéké</i> .	Amer	<i>Attiéké</i>
IM 93	12-20	Centre, Est	28	Ramification forte, résistance à la mosaïque, sensibilité aux acariens, mauvaise cuisson.	Amer	<i>Attiéké</i>
TMS4(2)1425	12-20	Centre, Ouest	30	Ramification dense, haute productivité, résistance à la mosaïque, vulnérabilité aux acariens, récolte aisée et saveur agréable.	Doux	<i>Attiéké</i> , Foutou
TMS 30572	12-20	Centre, Est et Nord	30	Ramification robuste, forte productivité, résistance à la mosaïque, vulnérabilité aux acariens et aux cochenilles.	Amer	<i>Attiéké</i>
BOCOU 1	12-24	Répandue	20	Productivité élevée, résistance à la mosaïque, et susceptibilité aux acariens et aux cochenilles, taux de matière sèche élevé (39 %).	Doux	<i>Attiéké</i> , Foutou
Yavo	12-20	Sud, Centre et Est	30	Taux de matière sèche élevé (40 %) résistance à la mosaïque, rendement élevé.	Doux	<i>Attiéké</i> , Foutou

Ces nombreux avantages sont à l'origine de son essor, aux dépens des cultures d'igname et de maïs nécessitant plus de travail. Toutefois, la culture du manioc affecte négativement la fertilité des sols (Voko Bi *et al.*, 2013).

1.4.3. Mise en place de la culture du manioc en Côte d'Ivoire

1.4.3.1. Préparation du terrain

Le manioc prospère dans les sols riches en matières organiques et à la texture sablo-argileuse. Par conséquent, un enfouissement des débris végétaux est recommandé lors du labour. En outre, il est préférable d'éviter les sols hydromorphes qui retiennent trop d'eau et sont mal drainés. Idéalement, les terrains les plus adaptés à la culture du manioc sont plats ou légèrement inclinés (Akpigny & Koulou, 2017).

1.4.3.2. Préparation du matériel végétal

Les tiges sont prélevées dans un champ propre sur des pieds sains et vigoureux (Figure 2). Pour assurer une plantation réussie, il est essentiel de suivre des recommandations. En effet, les boutures à utiliser doivent être saines pour garantir la santé future des plants. En outre, les tiges de manioc attaquées par les ravageurs et les maladies ainsi que les parties trop âgées ou tendres doivent être évitées lors du choix. Pour la coupe des boutures, elle doit être effectuée juste avant la plantation en utilisant des outils appropriés. Pour l'enfouissement, seules des boutures mesurant entre 10 à 20 cm de long et comportant 4 à 7 nœuds sont recommandées. Par ailleurs, les boutures doivent être placées dans le bon sens pour une germination optimale (Akpigny & Koulou, 2017).



Figure 2 : Boutures de manioc (Anonyme 1, 2025)

1.4.3.3. Plantation

Les dates de plantation diffèrent selon les régions et les localités. Toutefois, il est recommandé de planter le manioc au début de la saison des pluies pour assurer de bons résultats, étant donné que le jeune manioc est peu résistant à la sécheresse. Les boutures peuvent être plantées sur des terrains plats, des buttes ou des billons, mais il est préférable de choisir un sol bien labouré pour optimiser les rendements. La densité de plantation recommandée est de 10000 pieds par hectare. Cette densité chute à 3000 pieds par hectare lorsqu'il est associé à la banane plantain (Akpiny & Koulou, 2017).

1.4.3.4. Fertilisation et culture du manioc

Le manioc prospère et peut atteindre des rendements satisfaisants même sur des sols où de nombreuses autres cultures échoueraient. Il montre une grande tolérance aux sols pauvres en phosphore, souvent capable de croître même sans apport de fertilisation minérale. Cette aptitude est le résultat de son association avec un groupe de champignons du sol appelés mycorhizes à vésicule et arbuscule. Ces champignons sont largement répandus dans le sol. Ils se nourrissent des glucides dans les racines de manioc qu'ils pénètrent. En échange, leurs filaments de mycélium étendus apportent à la plante du phosphore et d'autres micronutriments qu'ils puisent dans une zone de sol bien plus étendue que celle accessible directement par les racines. Cette relation symbiotique permet au manioc d'assimiler suffisamment de phosphore pour assurer une croissance robuste. Pour une culture continue sur un sol, il est possible de maintenir la fertilité en utilisant des engrais (Akpiny & Koulou, 2017).

1.5. Valorisation post-récolte du manioc

1.5.1. Quelques domaines de valorisation du manioc

Le manioc est une plante polyvalente utilisée tant pour l'alimentation humaine qu'animale. Il est également une matière première essentielle dans diverses industries telles que la production d'éthanol, de vinaigre, d'adhésifs, de textiles et dans l'imprimerie. Dans l'industrie pharmaceutiques, son utilisation comme excipients a été rapportée (Djoko *et al.*, 2021).

1.5.2. Diversité de produits dérivés

Selon AGASA (2011), la racine de manioc est consommée de diverses manières (crue, cuite ou transformée). En Afrique, de nombreux produits dérivent de la transformation du manioc. Il s'agit notamment des cossettes, de la farine brute, du gari, du tapioca, etc. Parmi les

Généralités

produits dérivés, certains sont particulièrement populaires dans des régions. C'est le cas du *chikwangue* au Congo, du *fufu* au Ghana, du *gari* au Bénin, de la farine au Nigéria et de l'*attiéké* en Côte d'Ivoire. En plus des racines, les feuilles de manioc sont utilisées pour préparer des sauces. Elles sont riches en minéraux tels que le calcium et le phosphore, et contiennent beaucoup plus de protéines que les racines. Dans l'industrie, le manioc sert entre autres à la production de fécule, d'amidon, de pâtes alimentaires, de colles, de biscuits et de sirop de glucose (Djoule, 2005). Par ailleurs, les diagrammes de fabrication de certains de ces produits dérivés sont présentés sur la figure 3.

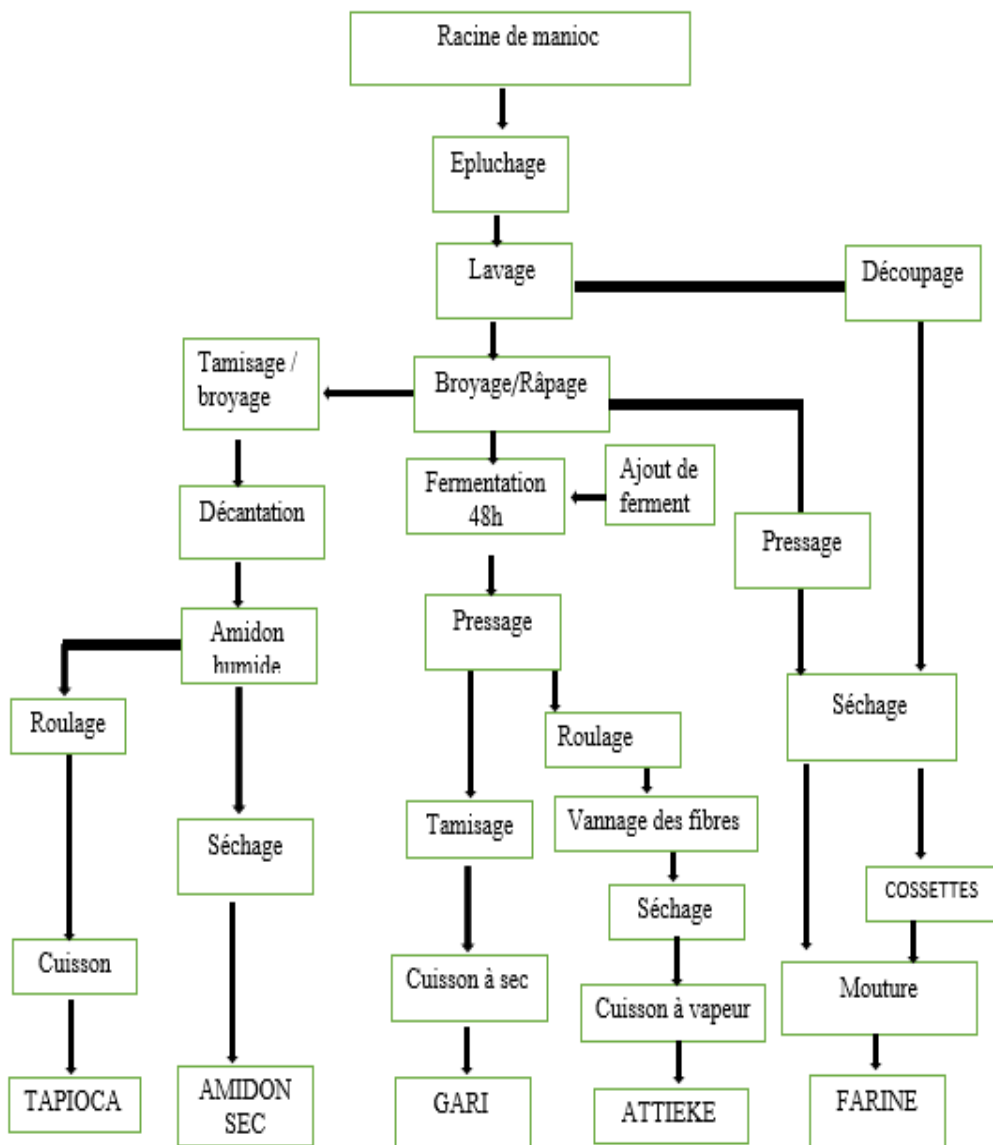


Figure 3 : Transformation artisanale du manioc (Diallo *et al.*, 2013)

1.5.3. Transformation des racines en *attiéké*

1.5.3.1. Origine et définition de l'*attiéké*

L'*attiéké* est originaire de la Côte d'Ivoire, précisément de la région Sud du pays. Il était consommé principalement par les peuples lagunaires (Ebrié, Adjoukrou, Ahizi, Alladjan et Avikam) (Assanvo *et al.*, 2002). Le terme « attiéké » provient du mot « adjèkè » utilisé dans la langue Ebrié du Sud de la Côte d'Ivoire.

Historiquement, et parfois encore aujourd'hui, les femmes Ebriés préparent l'*attiéké* de manière différente pour la vente par rapport à celui qu'elles consomment au sein de leur propre foyer. Ainsi, elles désignaient le produit destiné au commerce sous le nom d'*adjèkè* pour le distinguer de celui consommé à la maison. Par la suite, ce terme a été diffusé sous la forme « atchèkè » par les transporteurs bambaras. Les colons pour motif d'esthétisme proposèrent *attiéké*. Cependant, il est souvent prononcé *tch(i) éké*, avec amuïssement dans la rue (Assanvo *et al.*, 2002).

Fabriqué à partir de racines de manioc fraîches épluchées, concassées, lavées, broyées, fermentées, essorées, granulées, tamisées, pré-séchées, vannées et cuites à la vapeur, l'*attiéké* est une semoule de manioc à texture agglomérée (CODINORM, 2018). La presque totalité de l'*attiéké* produit est de fabrication artisanale et son expansion a été facilité par le développement d'Abidjan à partir des années 1950 (Diancoumba, 2008).

1.5.3.2. Valeur nutritive de l'*attiéké*

Aliment essentiellement énergétique, l'*attiéké* a une teneur en glucides totaux supérieure à 90 % et une teneur en fibres alimentaires de l'ordre de 2 à 3 %. La cellulose et la dextrine sont les principales fibres alimentaires présentes dans l'*attiéké* (Sotomey *et al.*, 2001). Concernant la teneur en protéines, elle est généralement inférieure à 2 %. Au niveau des lipides, la teneur est moins de 1 %. En outre, les principaux minéraux rencontrés dans l'*attiéké* sont le phosphore, le magnésium, le fer, le calcium, le potassium et le sodium (Sotomey *et al.*, 2001). Par ailleurs, des propriétés probiotiques peuvent lui être associées du fait de la composition de sa flore bactérienne.

1.5.3.3. Production de l'attiéké

Le diagramme de fabrication de l'attiéké est présenté sur la figure 4. Toutefois, quelques variations ont été notées au niveau de certaines opérations unitaires. Ces variations découlent du fait que chaque productrice cherche à ajouter une touche particulière pour se démarquer des autres dans le but de séduire la clientèle. La fabrication de l'attiéké débute par la réception de la matière première constituée des racines fraîches de manioc. Une fois réceptionnées, les racines sont épluchées, découpées en cossette et lavées. Les morceaux obtenus sont broyés, additionnés de ferment de manioc et d'huile de palme blanchie. La pâte obtenue est mise dans des sacs et laissée fermenter entre 24 et 72 heures. Au terme de cette fermentation, la pâte est essorée puis émiettée. Le semoulage intervient pour donner des granules qui sont séchés et cuits à la vapeur. La semoule cuite obtenu correspond à l'attiéké (Sotomey *et al.*, 2001).

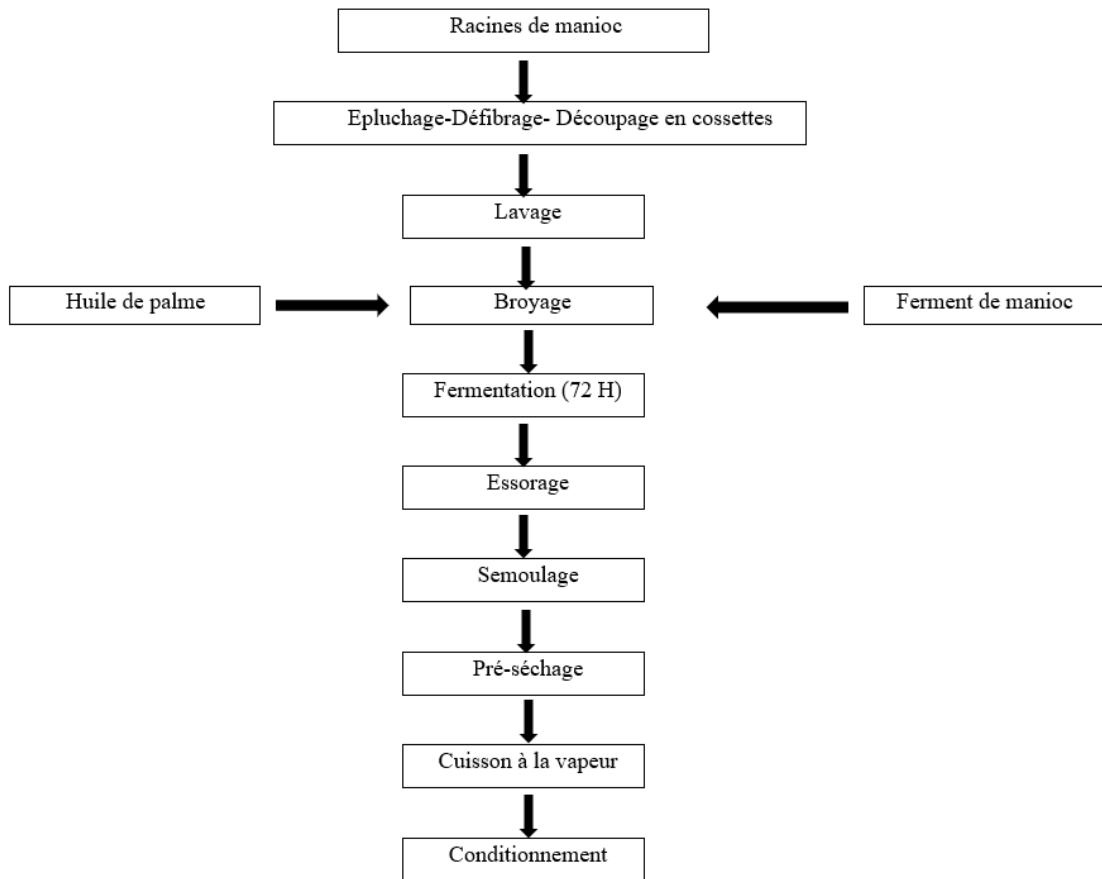


Figure 4 : Diagramme de production d'attiéké (Gnagne *et al.*, 2016)

1.5.3.4. Conditionnement de l'*attiéké*

L'*attiéké* peut être conservé pendant une semaine pour 78,9 % des productrices, tandis que 21,1 % d'entre elles affirment qu'il se conserve plus longtemps, à condition d'être bien séché et bien cuit (Krabi *et al.*, 2015). Le conditionnement de l'*attiéké* s'effectue dans des sachets plastiques transparents avant d'être livré aux revendeuses (Guira, 2013).

1.6. Composés cyanogéniques et toxicité du manioc

1.6.1. Structure des composés cyanogéniques du manioc

La toxicité du manioc est liée à la présence des composés cyanogéniques (Cliff *et al.*, 2011). Ces derniers sont présents dans de nombreuses espèces végétales. C'est le cas de la dhurine du sorgho, de l'amygdaline dans les amandes, de la linamarine et la lotaustraline dans le manioc (Cooke, 1982).

Tous les tissus du manioc accumulent les cyanogènes (linamarine 95 % et lotaustraline 5 %) dont le taux varie selon l'âge et la variété (Bala, 2011). Ils sont solubles dans l'eau, un peu moins dans l'acétone, l'alcool, et insoluble dans l'éther (Zouménou, 1994). La figure 5 illustre la structure chimique de la linamarine et de la lotaustraline.



Linamarine

Lotaustraline

Figure 5 : Structure chimique de la linamarine et de la lotaustraline (Cereda & Mattos, 1996 ; Bala, 2011)

1.6.2. Biosynthèse et dégradation des glucosides cyanogéniques

Naturellement, la plante synthétise des composés cyanogéniques et les stocke dans ses organes (Nzigamasabo & Zhou, 2006). Au niveau du manioc, la linamarine est synthétisée dans les pétioles des jeunes feuilles et accumulée dans les vacuoles des cellules foliaires. C'est à partir de ces feuilles qu'elle est véhiculée jusqu'aux racines grâce au phloème (Fokunang *et al.*, 2001). Par ailleurs, il est bien connu que les composés cyanogéniques et les enzymes

indispensables à leur dégradation sont présents séparément dans la plante de manioc (McMahon *et al.*, 1995). Lorsque les tissus sont endommagés et que les structures cellulaires sont perturbées, la linamarine et la lotaustraline entrent en contact avec la linamarase et la β -glucosidase, enzymes qui les décomposent en glucose et en cyanhydrine. L'activité optimale de la linamarase se situe à un pH compris entre 6 et 7 pour une température de 55 °C (Fokunang *et al.*, 2001). Par la suite, la cyanhydrine est dégradée en acétone et en acide cyanhydrique (HCN), une substance volatile et très toxique (Janos, 2000 ; Kimaryo *et al.*, 2000). Cette réaction peut se produire spontanément lorsque la température est supérieure à 35 °C et le pH est supérieur à 4 (White *et al.*, 1994). La figure 6 illustre le processus de dégradation enzymatique de la linamarine, dont les produits peuvent être responsables d'une certaine toxicité.

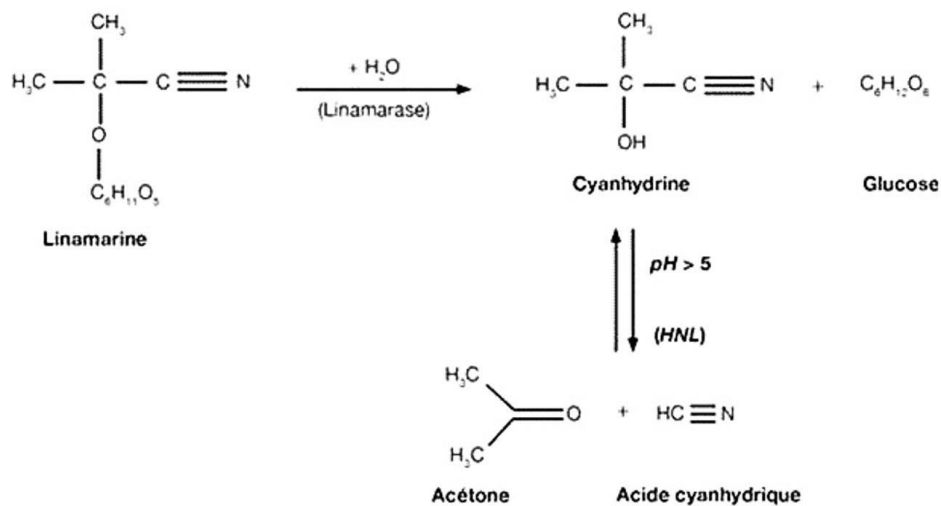


Figure 6 : Hydrolyse enzymatique de la linamarine (Falade & Akingbala, 2010).

1.6.3. Toxicité des composés cyanogéniques

La quantité de composés cyanogéniques dans le manioc varie selon l'organe de la plante, son âge, sa variété et les conditions environnementales telles que le sol, l'humidité et la température (Nzigamasabo & Zhou, 2006). Il est établi que le transfert de génotypes de manioc d'une localité à une autre peut altérer la teneur en composés cyanogènes des racines en raison des variations climatiques et des propriétés du sol (IITA, 1993). Au Nigeria, Bokanga *et al.* (1994) ont observé de telles différences au sein d'une même variété.

Les variétés de manioc peuvent être classées en fonction de leur taux de libération d'acide cyanhydrique à partir de racines fraîchement pelées :

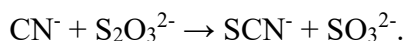
- variétés « inoffensives » : moins de 50 mg HCN/kg ;
- variétés modérément « toxiques » : entre 50 et 100 mg HCN/kg ;
- variétés fortement « toxiques » : plus de 100 mg HCN/kg (Kobawila *et al.*, 2005).

Les glucosides cyanogéniques ne sont pas toxiques en soi, mais une fois ingérés par l'homme, ils subissent une dégradation en acide cyanhydrique par les enzymes présentes dans les intestins (Ouegnin, 1988). Chez l'homme, la dose de 1 mg HCN/kg de poids vif est susceptible de provoquer des intoxications aiguës (Silvestre & Arraudeau 1983). D'autres auteurs comme Shibamoto & Bjeldanes (1993) ont situé la dose létale minimale entre 0,5 et 3,5 mg HCN/kg de poids corporel. Chez les animaux, la dose létale est de 1 mg HCN/kg de poids vif. Toutefois, les animaux polygastriques peuvent ingérer sans danger des doses 3 à 4 fois plus élevées (Silvestre & Arraudeau 1983).

1.6.4. Pathologies liées aux composés cyanogéniques et traitements

Plusieurs pathologies sont liées à la consommation régulière du manioc. Celles-ci sont en partie dues aux produits de dégradation des glucosides cyanogènes (Tylleskär *et al.*, 1992). Parmi ces pathologies, il y a le nanisme, le goitre thyroïdien et la neuropathie tropicale ataxique (Kobawila *et al.*, 2005). Dans de nombreux pays d'Afrique australe, orientale et centrale, une maladie appelée Konzo est associée à une forte consommation de farine de manioc. Cette maladie est caractérisée par une paralysie irréversible des jambes chez les femmes en âge de procréer et les enfants (Essers *et al.*, 1992). En Afrique de l'Ouest, le Konzo n'a pas été signalé, probablement parce que le gari et les autres produits transformés à partir du manioc contiennent moins de cyanure (Cardoso *et al.*, 2005).

Le traitement de l'intoxication au cyanure implique l'administration d'amyle nitrite qui favorise la respiration cellulaire (Akanji *et al.*, 1990). En effet, les ions cyanures inhibent l'activité de la cytochrome-oxydase, une enzyme mitochondriale responsable des oxydations cellulaires chez les organismes aérobies (Friedman, 1980). L'élimination du cyanure est également améliorée par l'administration de thiosulfate, favorisant ainsi la formation de thiocyanates (Fokunang *et al.*, 2001) :



1.6.5. Méthodes de détoxification du manioc

De nombreuses méthodes permettent de détoxifier le manioc. Il s'agit notamment de l'épluchage, du blanchiment, de la cuisson à l'eau, de la cuisson à la vapeur, du séchage, de la fermentation et de la friture. En fonction du procédé utilisé, les composés cyanogéniques peuvent subir une hydrolyse, libérant de l'acide cyanhydrique qui est évaporé, ou bien être solubilisés avec les produits de cette hydrolyse, entraînés dans l'eau (Guira, 2013).

1.7. Principaux constituants du manioc

En Afrique, le manioc est utilisé principalement pour l'alimentation humaine (95 % de la production totale) contre 55 % en Asie et 40 % en Amérique latine (Guira, 2013). La racine de manioc est principalement reconnue comme un aliment énergétique essentiel. C'est la partie la plus utilisée, caractérisée par sa richesse en glucides et sa faible teneur en matières grasses. Ces concentrations fluctuent selon la variété, l'emplacement géographique, l'âge de la plante récoltée et les conditions environnementales (Balagapolan *et al.*, 1988). Les racines de manioc présentent une teneur en humidité variant de 60 à 70 % de la matière fraîche, les protéines représentent entre 1 à 2,27 % de la matière sèche (Tableau II). Une faible quantité de lipides et de minéraux a été également observée (Koko *et al.*, 2014 ; Vernier *et al.*, 2018 et Peprah *et al.*, 2020). L'amidon représente la principale composante des glucides, avec des concentrations entre 64 et 87 % de matière sèche (Diallo *et al.*, 2013). Une particularité de l'amidon de manioc est sa faible teneur en amylose, environ 17 % de matière sèche, comparée à celle de la pomme de terre (22 % de la matière sèche) et du maïs (21 % de la matière sèche) (Diallo *et al.*, 2013). Les protéines du manioc sont abondantes en arginine mais déficientes en acides aminés essentiels comme la phénylalanine, la lysine, la méthionine, la tyrosine et le tryptophane (Falade & Akingbala, 2010). Le manioc offre donc un apport nutritionnel significatif en calories et peut être particulièrement bénéfique pendant les périodes de disette. Il est cependant reconnu que les racines de manioc présentent une certaine toxicité liée à la présence de composés cyanogéniques, ainsi qu'à d'autres facteurs antinutritionnels tels que les tanins, les phytates et les oxalates. Cette toxicité s'ajoute à la faible teneur du manioc en protéines, vitamines et minéraux. Toutefois, des procédés de transformation appropriés permettent d'en réduire significativement les effets.

Généralités

Tableau II : Variabilité de la composition chimique de la racine de manioc selon les sources
(A: Koko *et al.*, 2014 ; B : Vernier *et al.*, 2018 ; C : Peprah *et al.*, 2020)

Constituants (%)	Sources		
	A	B	C
Humidité	60,36-62,18	60-70	63,1-66,2
Glucides*	92,52-93,65	90-95	90,82-92,95
Lipides*	0,58-1,04	0,3	0,46-2,42
Protéines*	2,19-2,27	1	0,08-0,48
Fibres*	-	1	3,07-4,47
Cendres*	2,29-2,67	0,9	1,53-1,54

(*) : Teneurs exprimées par rapport à la matière sèche

(-) : Valeur non déterminée

2. GENERALITES SUR LA METHANISATION

La méthanisation est une technique de traitement des déchets et des effluents qui conduit à la formation de deux produits valorisables : le biogaz et le digestat. La qualité physico-chimique du digestat est étroitement liée à la qualité des intrants utilisés dans les unités de méthanisation. Elle dépend également des procédés de méthanisation utilisés, et d'un éventuel traitement complémentaire des digestats (maturation aérobie, séchage, etc.) (Doublet *et al.*, 2004).

2.1. Procédés de méthanisation

La méthanisation, aussi connue sous le nom de digestion anaérobie, est un processus biologique qui transforme la matière organique en biogaz, principalement composé de méthane et de dioxyde de carbone, grâce à l'action combinée de divers micro-organismes en l'absence d'oxygène (Cresson, 2006). Ce procédé est principalement utilisé pour traiter les déchets humides riches en matière organique (Shiralipour & Smith, 1984). Les sources de matière première adaptées à la méthanisation incluent les déchets agricoles tels que les déjections animales et les résidus végétaux, les résidus de l'industrie agro-alimentaire, les boues issues des stations d'épuration ainsi que les déchets ménagers (Shiralipour & Smith, 1984). Ce processus est constitué de quatre étapes de dégradation de la matière organique et implique diverses populations des bactéries (Figure 7) (Moletta, 2008). Ces réactions biologiques successives conduisent à la production de biogaz, principalement composé de méthane, ainsi que de digestat

(Naik *et al.*, 2010). Le biogaz peut être utilisé pour produire de l'électricité et de la chaleur, tandis que le digestat est utilisé comme fertilisant dans les champs agricoles (Couturier & Galtier, 2004).

2.2. Différentes étapes de la méthanisation

2.2.1. Hydrolyse

La première phase de la digestion anaérobie est l'hydrolyse, assurée par diverses bactéries anaérobies strictes ou facultatives telles que les bactéries hydrolytiques (*Clostridium* sp., *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp.) (Saidi & Abada, 2007). Ces micro-organismes décomposent les composés organiques complexes (polysaccharides, lipides et protéines) en monomères plus simples tels que les sucres, les acides gras et les acides aminés (Vedrenne, 2007). L'hydrolyse est une étape importante dans le processus de méthanisation, car elle permet de rendre disponible la matière organique non soluble.

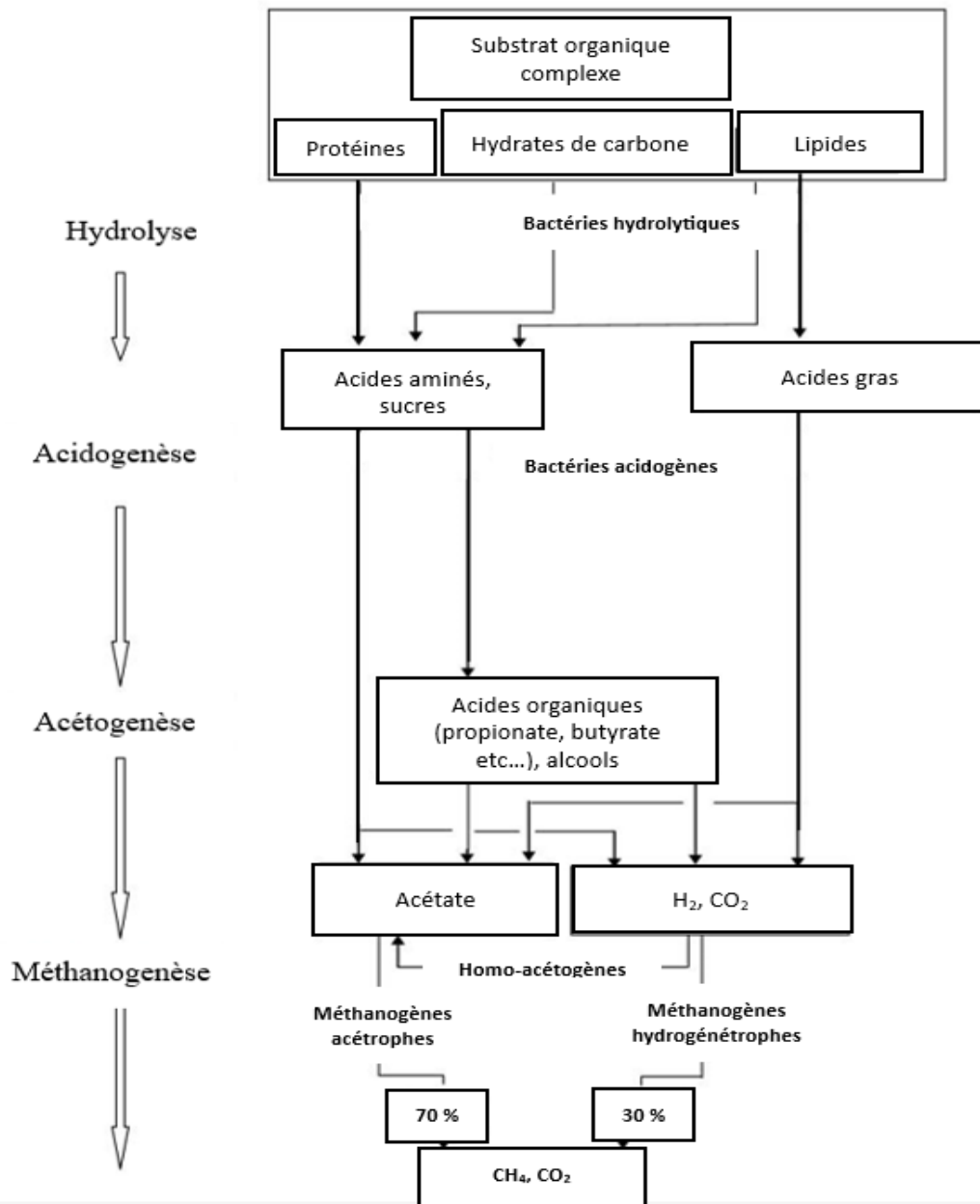


Figure 7 : Schéma des étapes de la méthanisation (Pavlostathis & Giraldo-Gomez, 1991).

2.2.1.1. Hydrolyse des composés glucidiques

L'hydrolyse des glucides inclut la dégradation des glucides simples et complexes. Les glucides simples offrent une source d'énergie facilement accessible pour la biomasse, tandis que les glucides complexes tels que la cellulose, l'amidon, l'hémicellulose et la lignine, sont plus difficiles à dégrader. Malgré leur complexité, ces composés sont très abondants et servent de composants structuraux ou de réserves d'énergie. Par exemple, la cellulose est le polymère le plus répandu sur Terre, et avec l'amidon, elles constituent les polysides les plus couramment

rencontrés dans la nature (Angeli, 2019). La biodégradabilité de ces composés dépend de leurs structures internes, qui affectent l'accessibilité des enzymes, ainsi que des enzymes disponibles selon les conditions opératoires (anaérobie). Dans la nature, les polysaccharides forment des matrices denses composées d'oses simples liés entre eux de diverses manières (Sun *et al.*, 2004). La biodégradabilité d'un polysaccharide est donc déterminée par la prédominance de structures cristallines ou amorphes reliant les oses qu'il contient (Akerholm *et al.*, 2004). Une partie des glucides est soluble et l'autre insoluble. Ceux devenus solubles après hydrolyse se transforment en disaccharides et monosaccharides, comme le glucose, qui seront ensuite utilisés lors de l'acidogénèse (Angeli, 2019).

2.2.1.2. Hydrolyse des composés azotés

L'hydrolyse des composés azotés, qu'ils soient d'origine protéique (comme les protéines) ou non (comme l'urée et la créatinine), permet aux micro-organismes de synthétiser leurs propres protéines, éléments structuraux et acides nucléiques. Les protéines sont hydrolysées en polypeptides, oligopeptides et acides aminés, qui sont ensuite assimilés par les micro-organismes et catabolisés. En général, ces protéines proviennent des déchets alimentaires. Les acides nucléiques, issus de la lyse des micro-organismes, servent également de substrat pour la biomasse microbienne (Appels *et al.*, 2008).

2.2.1.3. Hydrolyse des lipides

L'hydrolyse des lipides produit des acides gras à longue chaîne et du glycérol. Ces éléments seront ensuite utilisés lors de l'acidogénèse pour constituer la biomasse microbienne et former du propionate ainsi que divers acides. Toutefois, une hydrolyse excessive peut entraîner une concentration élevée d'acides gras à longue chaîne ; ce qui peut inhiber leurs propres voies de dégradation. L'accumulation de ces acides dans un réacteur est une cause fréquente de réduction du rendement en méthane, nécessitant ainsi un contrôle rigoureux de leurs concentrations (Hanaki *et al.*, 1981).

L'hydrolyse dépend de nombreux facteurs physiques, principalement en raison du rôle important des enzymes. Ces dernières, qui sont des molécules protéiques, obéissent généralement aux équations de Michaelis-Menten. D'autres facteurs physiques influencent également l'activité enzymatique, tels que le temps de rétention hydraulique (TRH), qui détermine le temps de contact entre les enzymes et le substrat, particulièrement dans les

réacteurs à plusieurs compartiments. La fonction des enzymes, étant basée sur leur conformation protéique, est également affectée par des paramètres tels que la température et le pH. En raison de ces variables, l'étape d'hydrolyse est souvent considérée comme un goulot d'étranglement, ce qui conduit à la mise en place de nombreux prétraitements visant à optimiser et maximiser les conditions influençant son rendement (Lyberatos & Skiadas, 1999 ; Mata-Alvarez, 2003 ; Appels *et al.*, 2008).

2.2.2. Acidogenèse

Après l'hydrolyse, la matière organique est transformée en monomères, la rendant ainsi disponible et accessible pour la biomasse microbienne. Les composés sont ensuite transformés à l'intérieur des cellules des micro-organismes fermentaires pour produire des acides organiques. De plus, la flore acidogène génère des composés neutres (alcool, glycérol), ainsi que de l'hydrogène et du dioxyde de carbone (Appels *et al.*, 2008).

L'accumulation d'acides gras volatils (AGV), résultant des métabolismes rapides de la flore acidogène, peut entraîner une forte diminution du pH et inhiber les étapes suivantes de la méthanisation. Pour surveiller la réaction dans le réacteur, des dosages des AGV peuvent être effectués. La composition et la croissance du consortium microbien influencent également la thermodynamique des réactions et l'équilibre du milieu. Il existe un lien entre les bactéries productrices d'hydrogène (acidogenèse) et celles qui consomment l'hydrogène (acétogènes, méthanogènes, bactéries sulfato-réductrices), ce qui permet la régulation de la pression partielle en hydrogène et le maintien d'une niche méthanogène adéquate (Harper & Pholand, 1986).

2.2.3. Acétogenèse

Au cours de la troisième étape, les composés issus de l'acidogenèse sont oxydés en substrats adaptés à la production de méthane, à savoir l'acétate, le dioxyde de carbone et le dihydrogène. Les acides organiques précédemment formés seront ainsi oxydés par des bactéries acétogènes hétérofermentaires (Stams *et al.*, 2006). Cette conversion entraîne la formation d'acétate tout en libérant une quantité significative d'hydrogène (H₂) et de dioxyde de carbone (CO₂). Cependant, cette réaction est thermodynamiquement défavorable, et la production excessive d'hydrogène peut provoquer une diminution importante du pH du milieu, ce qui peut freiner la méthanisation (Siegert & Banks, 2005 ; Sperling & Chernicharo, 2005). Il a été observé que la dégradation du butyrate ne se produit qu'en présence de dioxyde de carbone

(CO₂), qui en réagissant avec l'hydrogène (H₂), forme de l'acétyl-CoA. Ce dernier, grâce à l'ADP, produit ensuite de l'ATP et de l'acétate (Siriwongrungsorn *et al.*, 2007). L'équilibre ainsi atteint rend la réaction globale exergonique, grâce à l'action de deux types de bactéries supplémentaires : les homoacétogènes et les méthanogènes hydrogénophiles (Hattori, 2008).

2.2.4. Méthanogenèse

La méthanogenèse constitue l'étape essentielle de la méthanisation. Elle joue un rôle central dans la production de biogaz, en convertissant l'acétate en méthane et dioxyde de carbone, tout en produisant également de l'eau à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène (Girault, 2011). La première conversion constitue généralement environ 70 % de la production totale de méthane, ce qui en fait la voie principale pour la génération de ce gaz. Elle est principalement réalisée par des archées acétoclastiques (Harper & Pholand 1986). La seconde réaction de production de méthane est facilitée par la présence de bactéries hydrogénotrophes, qui génèrent environ 30 % du méthane et régulent la consommation de dihydrogène. Il existe ainsi un lien syntrophique entre ces bactéries et les archées acétogènes de l'acidogenèse (Bryant *et al.*, 1977).

La sensibilité de la méthanogenèse découle principalement de la vulnérabilité des micro-organismes responsables de ce processus. En raison des conditions thermodynamiques des réactions et de leur affinité pour les substrats, des compétitions peuvent se produire entre les méthanogènes et les bactéries hydrogénotrophes ou les bactéries sulfato-réductrices (BSR). Le risque d'inhibition dépend du rapport Demande Chimique en Oxygène/sulfate (DCO/SO₄²⁻), lorsque ce rapport est élevé, la concentration en sulfate devient alors le facteur limitant au développement des Bactéries Sulfato-Réductrices (Hansen *et al.*, 1998). En outre, la nature du substrat peut considérablement influencer la méthanogenèse. Elle peut, par exemple, favoriser la prolifération de micro-organismes concurrents en raison de concentrations élevées de sulfate ou libérer des composés inhibiteurs durant sa dégradation (Angeli, 2019). La présence d'ammoniac, qu'il soit sous forme libre (NH₃) ou d'ion ammonium (NH₄⁺), peut entraîner une toxicité directe ou indirecte pour la méthanogenèse. Cette toxicité dépend de la température, du pH et du temps de séjour. Dans ce cas, l'inhibition peut être causée par une baisse significative du pH ou par l'inactivation des pompes à protons (qui régulent le transport du K⁺), conduisant ainsi à l'arrêt de la méthanogenèse (Yenigün & Demirel, 2013).

Parmi tous les métabolites produits par les bactéries fermentaires et acétogènes, seuls l'acétate et l'hydrogène sont directement utilisés par les micro-organismes méthanogènes. En fin de compte, on estime que seulement 50 % de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) biodégradable sera transformée en acide acétique et en hydrogène, facilitant ainsi la formation ultérieure de méthane et de CO₂ (Sperling & Chernicharo, 2005).

2.3. Paramètres de la méthanisation

Le bon déroulement de la méthanisation nécessite le contrôle de plusieurs paramètres essentiels (Kpata-Konan *et al.*, 2011). Un suivi régulier de ces paramètres est indispensable pour assurer la stabilité du processus ainsi que pour garantir la qualité et la quantité optimales de biogaz et de digestat produits (Demuynck *et al.*, 1984 ; De La Farge, 1995 ; Sabonnadière, 2007 ; Moletta, 2008).

2.3.1. Température

La température est un facteur physique essentiel qui influe directement sur l'activité des microorganismes anaérobies. C'est pourquoi, elle affecte la stabilité du processus de digestion, les rendements de production de biogaz et l'efficacité du traitement. La méthanisation peut être conduite à trois températures différentes (Kpata-Konan *et al.*, 2011) :

- la température psychrophile, entre 15 et 25 °C, qui permet une dégradation relativement lente de la matière organique ;
- la température mésophile, entre 30 et 40 °C, favorisant une dégradation plus rapide de la matière organique ;
- la température thermophile, entre 50 et 60 °C, qui entraîne une dégradation extrêmement rapide de la matière organique. Cette plage de température est particulièrement efficace pour traiter des charges organiques importantes en raison de la croissance rapide des microorganismes (Sentürk *et al.*, 2010 ; Almansour *et al.*, 2011).

2.3.2. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH est un paramètre chimique indispensable car les bactéries anaérobies, notamment les archées méthanogènes, sont sensibles à ses variations. Selon Parawira *et al.* (2006), le pH optimal pour le processus de méthanisation se situe entre 6,5 et 8,5. Une accumulation d'acides gras volatils ou d'hydrogène peut entraîner une chute rapide du pH en dessous de 5,0, provoquant ainsi une acidification du milieu réactionnel et une inhibition du processus de

méthanisation (Almansour *et al.*, 2011). Des valeurs de pH supérieures à 7,5, souvent dues à l'accumulation d'ammoniac, peuvent également inhiber les activités microbiennes à l'intérieur du réacteur (Colin *et al.*, 2007).

2.3.3. Homogénéité de substrat

L'homogénéité du substrat revêt une importance capitale pour optimiser les conditions de la méthanisation. Elle assure un contact efficace entre la biomasse traitée et les micro-organismes tout en évitant les gradients de température dans le digesteur. Pour maintenir cette homogénéité, plusieurs méthodes sont recommandées, comme le soulignent Almansour *et al.* (2011). Il s'agit entre autres du brassage mécanique et de la recirculation sous pression du biogaz produit.

2.3.4. Concentration de matière organique dans les substrats

La concentration en matière organique des substrats utilisés est un facteur important pour le fonctionnement optimal de l'installation et pour estimer les quantités de biogaz produites. Ce paramètre peut être évalué par la Demande Chimique en Oxygène (DCO), exprimée en masse d'oxygène consommée pour la dégradation biologique ($\text{g O}_2/\text{L}$). Mesurer cette valeur à l'entrée et à la sortie du méthaniseur permet de calculer l'efficacité du traitement. En outre, le Carbone Organique Total (COT) peut également être utilisé pour évaluer cette concentration (Almansour *et al.*, 2011).

2.3.5. Composition en nutriments

Pour assurer une croissance optimale, les bactéries anaérobies requièrent des nutriments essentiels tels que le carbone (C), l'azote (N) et le phosphore (P), avec un ratio optimal C/N/P estimé à 100/5/1. En plus de ces nutriments, d'autres éléments minéraux sont nécessaires, notamment le magnésium qui joue un rôle important dans la dernière étape de la synthèse du méthane, ainsi que le calcium, le potassium, le cuivre, le fer, le cobalt, le nickel (Moletta, 2008).

2.3.6. Inhibiteurs de la méthanisation

Certains composés toxiques ou présents en concentrations élevées peuvent restreindre voire inhiber le développement des microorganismes méthanogènes, ce qui peut entraîner une diminution de la production de biogaz. Parmi ces substances, on trouve l'oxygène, l'ammoniac, le chlorure de sodium, ainsi que des métaux lourds comme le cuivre, le chrome et le nickel. Des

composés tels que les antibiotiques et les antiseptiques en font également partie (Marache, 2001).

2.4. Types et formes d'alimentation du digesteur

Le digesteur (encore appelé fermenteur ou réacteur) anaérobie est généralement composé d'une cuve fermée, étanche à l'air et isolée thermiquement de l'extérieur (Kpata, 2014). Sa fonction est d'assurer la fermentation dans les conditions où son volume doit être suffisant pour respecter la cinétique des réactions biologiques.

2.4.1. Types de digesteurs selon l'état du substrat.

Selon Farinet (2008), il existe deux grandes familles de digesteurs. Il y a ceux destinés aux liquides et ceux pour les solides. Dans les digesteurs pour liquides, le substrat s'écoule gravitairement ou est poussé par une pompe de l'entrée vers la sortie du réacteur. Le modèle de base est la fosse septique conventionnelle. Les procédés de méthanisation dans le cas des liquides, se différencient principalement par le mode de rétention de la biomasse à l'intérieur du digesteur. Dans les digesteurs destinés aux substrats solides, les intrants (solides ou pâteux) sont renouvelés périodiquement, soit en totalité, soit partiellement, par des moyens mécaniques. Les procédés de méthanisation dans le cas des solides, se distinguent par leur mode de transit des déchets, qu'il soit mécanique ou sous pression de gaz.

Les procédés actuels de méthanisation varient du plus simple au plus complexe en fonction de critères externes tels que la facilité d'exploitation, la productivité, le coût, et le rendement de production (Farinet, 2008). En général, une installation complète de méthanisation comprendra, en plus du digesteur :

- en amont : une fosse ou aire tampon pour le stockage et l'homogénéisation, ainsi qu'un dispositif d'alimentation du digesteur ;
- en aval : des équipements pour le stockage et l'utilisation du biogaz, une fosse ou aire de collecte du digestat composée si nécessaire d'une zone de séparation solide/liquide, ainsi qu'une aire de maturation et d'affinage du compost
- un système de traitement de la fraction liquide résiduelle si nécessaire.

2.4.2. Formes d'alimentation du digesteur

Selon Tcha-Tom (2019), quatre (4) procédés sont à distinguer en fonction du mode de circulation du substrat. Il s'agit des procédés continus, discontinus, semi-continus et multi-étages. Dans les procédés continus, les substrats sont introduits et extraits de manière continue dans les digesteurs. La quantité de substrat ajoutée est équilibrée par celle retirée, facilitant ainsi la maintenance. Ces méthodes sont largement adoptées à l'échelle mondiale.

Concernant les procédés discontinus ou procédés batch, les substrats sont extraits uniquement lorsque la digestion est complète ou lorsque le taux de production de biogaz atteint un plateau après une phase exponentielle initiale. Ces procédés sont particulièrement adaptés aux pays en développement où le coût de la main-d'œuvre est bas. Pour les procédés semi-continus, le digesteur est rempli progressivement avec des charges successives, soigneusement réparties dans le temps. A ce niveau, l'extraction des produits se fait lorsque le volume utile du digesteur est atteint et que la production de biogaz devient insuffisante (Tcha-Tom, 2019).

Dans les procédés multi-étages, les diverses phases de la digestion (hydrolyse, acidogénèse, acétogénèse et méthanogénèse) sont réalisées de manière distincte et séparée.

2.5. Produits issus de la méthanisation

2.5.1. Biogaz

Le biogaz produit au cours de la digestion anaérobie de la matière organique est composé principalement de CH₄ et de CO₂ (Le Hyaric *et al.*, 2010 ; Kpata, 2014). Il contient également des quantités faibles d'azote, d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène (Tableau III). Par ailleurs, le biogaz, produit dans un environnement humide, est souvent saturé d'eau à la sortie du digesteur. La quantité de méthane dans le biogaz, déterminante pour son utilisation en tant que combustible ou carburant, dépend du type de substrat digéré et est mesurée en pourcentage volumique (%). Dans le cas des effluents agro-industriels et des déchets d'élevage, riches en azote, le biogaz produit est riche en méthane (65 - 70 %). Cependant, une diminution des proportions en méthane est constatée lorsque les déchets utilisés sont pauvres en azote comme dans le cas des ordures ménagères et des déchets végétaux (Farinet, 2008). Par ailleurs, la qualité du biogaz est appréciée essentiellement par le pourcentage de méthane (CH₄) qu'il contient. Ainsi, un biogaz est meilleur si son pourcentage en méthane est élevé (65 à 70 %) (M'Sadak *et al.*, 2012).

Généralités

Pour sa valorisation, le biogaz peut être utilisé sous trois formes : en énergie thermique, en énergie électrique ou en biocarburant (Moletta, 2004). Il peut également être injecté dans le réseau de gaz naturel après purification. Une équivalence existe entre le biogaz et d'autres sources d'énergie. Ainsi, 1 m³ de biogaz brut équivaut à 6,2 kWh d'énergie électrique (Tableau IV).

Tableau III : Composition générale d'un biogaz (Razanaparany, 2005).

Composantes	Symboles	Pourcentage
Méthane	CH ₄	50-70
Gaz carbonique	CO ₂	35-40
Hydrogène	H ₂	1-3
Oxygène	O ₂	0,1-1
Oxyde de carbone	CO	0-0,1
Azote	N ₂	0,5-3
Hydrogène sulfuré	H ₂ S	1-5
Vapeur d'eau	H ₂ O	Variable

Tableau IV : Equivalence entre le biogaz brut et d'autres sources d'énergie (Manoely, 2010)

Sources d'énergie	Equivalence 1 m ³ de biogaz brut
Essence	0,73 L
Alcool	1,10 L
Gasoil	0,65 L
Gaz naturel	0,61 L
Charbon de bois	1,24 kg
Energie électrique	6,20 kWh
Charbon	0,82 kg

2.5.2. Résidu de digestion : digestat

Le digestat est le produit résiduel organique issu du processus de méthanisation. Il comprend à la fois de la matière organique non dégradée pendant la digestion et des composés minéraux tels que l'azote (sous forme d'ammoniac), le phosphore, le potassium et des oligoéléments. Cette composition confère au digestat une forte valeur fertilisante, favorisant des rendements agricoles accrus grâce notamment à l'azote ammoniacal directement assimilable par les plantes (Rehl & Muller, 2011). Le digestat peut être utilisé brut ou subir des transformations pour améliorer sa qualité (Askri, 2015). Par exemple, une installation de méthanisation de 500 kW peut produire plus de 10 000 tonnes de digestat par an, avec une teneur en matière sèche d'environ 10 % (Kratzeisen *et al.*, 2010).

La composition du digestat varie selon les substrats utilisés, la source de l'inoculum, les conditions opératoires de la digestion anaérobie (pH, température, taux de charge organique, temps de rétention hydraulique) et les configurations du système de digestion (avec ou sans post-digesteur). De plus, le prétraitement des substrats avant la digestion influe également sur la composition du digestat (Mata-Alvarez *et al.*, 2014 ; Monlau *et al.*, 2015 ; Tampio *et al.*, 2016). Les digestats présentent une variabilité significative en termes de matière organique non digérée (Teglia *et al.*, 2011). En outre, un taux de charge organique élevé et un court temps de rétention hydraulique peuvent conduire à une proportion élevée, jusqu'à 35 %, de matière organique non digérée dans les digestats même après prétraitement (Monlau *et al.*, 2015). Par ailleurs, la concentration d'ammoniac dans le digestat varie selon le type de substrat et de fumier, comme démontré par une étude où le fumier de poulet a contribué à la plus grande quantité d'ammoniac dans le digestat par rapport au fumier de porc, de bovin et de lapin (Li *et al.*, 2015).

Dans les digestats, les paramètres importants à considérer sont entre autres le pH, la salinité, la teneur en nutriments et métaux lourds (Mata-Alvarez *et al.*, 2014). Concernant le pH des digestats, il est généralement légèrement alcalin, dans une gamme comprise entre 6,7 et 8,4, en raison de la dégradation des acides gras volatils et de la production d'ammoniac pendant le processus de méthanisation. L'ajout de bases fortes ou de carbonates est souvent nécessaire pour contrôler le pH et la capacité tampon du système, contribuant ainsi à maintenir l'alcalinité du digestat (Monlau *et al.*, 2015).

Les digestats de méthanisation se différencient des intrants par les caractéristiques suivantes (Möller & Müller, 2012) :

- une augmentation du ratio N-NH₄/N total ;
- une réduction du taux de matière organique ;
- une réduction de la demande biochimique en oxygène (DBO) ;
- une augmentation du pH ;
- une réduction du rapport C/N ;
- une réduction de la viscosité ;
- une augmentation de la granulométrie >10 µm (digestion des matières plus fines) ;
- une réduction des odeurs (Hansen & Nyord, 2005) ;
- une réduction de la teneur en microorganismes pathogènes (Saint-Denis, 2009).

2.6. Importance de la biométhanisation

La biométhanisation est une méthode de production d'énergie renouvelable à partir de la biomasse. Elle consiste en une série d'opérations biologiques de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène (EDORA/VALBIOM, 2012). Cette méthode présente plusieurs avantages d'ordre économique, social et environnemental.

2.6.1. Importance économique

La biométhanisation permet en premier lieu de mieux contrôler les charges financières sur la gestion des déchets et des fertilisants (Meres, 2005). Au niveau rural, la biométhanisation favorise la diminution des dépenses en besoin d'énergie. De plus, elle permet l'obtention d'engrais biologique qui a ses qualités propres et à moindre coût (Raharijaona, 2006). La dépense en engrais est réduite du fait que les digestats peuvent contribuer dans la fertilisation des champs de culture. De cette manière, les agriculteurs peuvent produire leur propres engrais liquides et solides à la place des engrais chimiques achetés (Celier, 2012).

Deuxièmement, l'application de la biométhanisation engendre des emplois directs et indirects. Comme conséquence, la réalisation sur terrain de la biométhanisation contribue à une amélioration de la source de revenus (EDORA/VALBIOM, 2012). Autrement dit, la biométhanisation est un moyen de tirer un maximum de profit sur les déchets (Randriamaitso, 2006).

2.6.2. Importance sociale

La disponibilité en énergie utilisable pour la population peut être améliorée par la pratique de la biométhanisation (Meres, 2005). En milieu rural, cette pratique contribue à améliorer les conditions de vie des populations en réduisant en particulier le temps consacré à la recherche du bois de chauffage. Aussi, l'utilisation de l'énergie produite à partir du biogaz diminue l'incidence des maladies respiratoires causées notamment par les fumées provenant de combustion du bois ou d'autres matériaux (Celerier, 2012).

Par ailleurs, la biométhanisation est une activité de dépollution. En effet, elle contribue à éliminer les odeurs provenant de certains déchets. En outre, c'est une alternative à l'enfouissement des déchets, constituant de ce fait une solution au niveau environnemental (Raharijaona, 2006). Socialement, la biométhanisation est intéressante pour les régions fortement peuplées, où la disponibilité en combustible constitue un problème. Pour les agriculteurs, l'application de la biométhanisation représente un complément d'activité (Raharijaona, 2006). En addition, les difficultés d'accès à l'électricité dans certaines zones rurales peuvent être réduites par la pratique de la biométhanisation (Indianombomazava, 2010).

2.6.3. Importance environnementale

La production d'énergies renouvelables notamment de biogaz par le procédé de biométhanisation de déchets est une stratégie efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Par ce procédé, les ressources naturelles peuvent être également préservées et les impacts négatifs des déchets sur l'environnement peuvent être réduits (Meres, 2005). En outre, l'utilisation du biogaz participe efficacement à la réduction de la déforestation. En effet, 1 m³ de biogaz utilisé en cuisson correspond à une superficie en culture de bois de l'ordre de 0,33 ha (Raharijaona, 2006). De cette manière, la biométhanisation réduirait l'utilisation du bois de chauffage et du charbon du bois (Celerier, 2012).

Par ailleurs, la biométhanisation réduit les charges polluantes de l'environnement particulièrement les charges microbiologiques et parasitaires. Les déchets sont souvent des sources d'agents pathogènes responsables de maladies. Par le fait de la biométhanisation, il y a amélioration de la situation d'hygiène (Randriamaitso, 2006).

3. GENERALITES SUR LA FERTILISATION

3.1. Définition de la fertilisation et types d'engrais

3.1.1. Définition de la fertilisation

La fertilisation se réfère à la gestion des apports en engrais et amendements, visant à maintenir ou à améliorer la fertilité du sol pour assurer des conditions optimales de croissance des plantes cultivées (Teffahi & Noun, 2021). Les principaux éléments fertilisants sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), souvent abrégés sous le symbole NPK. Ces éléments sont essentiels pour les plantes.

La fertilisation joue un rôle fondamental dans l'augmentation de la productivité des écosystèmes prairiaux, tout en ayant des conséquences environnementales variées, telles que le stockage du carbone avec des impacts positifs. La gestion de la fertilisation des plantes cultivées, y compris les prairies, est une préoccupation agronomique essentielle tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif. Cette question devient d'autant plus critique avec la croissance de la population humaine et de ses activités (Rambaut, 2022).

3.1.2. Différents types d'engrais

En fonction de la forme de l'engrais (solide ou liquide), de son effet (libération lente, action rapide ou dépôt) et de la manière dont il est formulé, deux grandes catégories d'engrais ont été identifiées (Teffahi & Noun, 2021). Il s'agit des engrais minéraux et organiques.

3.1.2.1. Engrais minéraux

Les engrais minéraux destinés à l'agriculture se présentent généralement sous forme de granulés sphériques ayant un diamètre de 2 à 3 mm (Figure 8a). Leur application se fait principalement de manière mécanique, soit par gravité, soit à l'aide de dispositifs centrifuges ou pneumatiques, qui peuvent produire des poussières. Il existe également des formulations liquides conçues pour la pulvérisation ou l'injection directe dans le sol. Pour un usage domestique, comme pour les plantes d'intérieur ou le jardinage, les engrais sont souvent disponibles en concentrés liquides à diluer, ou sous forme de granulés ou de bâtonnets imprégnés. Les engrais minéraux peuvent être classés en engrais simples (contenant de l'azote, du phosphore ou du potassium) ou en engrais composés, qui se présentent sous forme binaire (NP, NK, PK) ou ternaires (NPK) (Testud, 2004).

3.1.2.2. Engrais organiques

Pour les engrais organiques (Figure 8b), les éléments nutritifs sont principalement incorporés dans des composés organiques réduits contenant du carbone. Ces engrais proviennent souvent de matières animales ou végétales, comme les déchets agricoles (fumier), mais ils peuvent également être fabriqués synthétiquement. En outre, ils favorisent une augmentation de la teneur en humus et une amélioration de la qualité du sol (Teffahi & Noun, 2021).

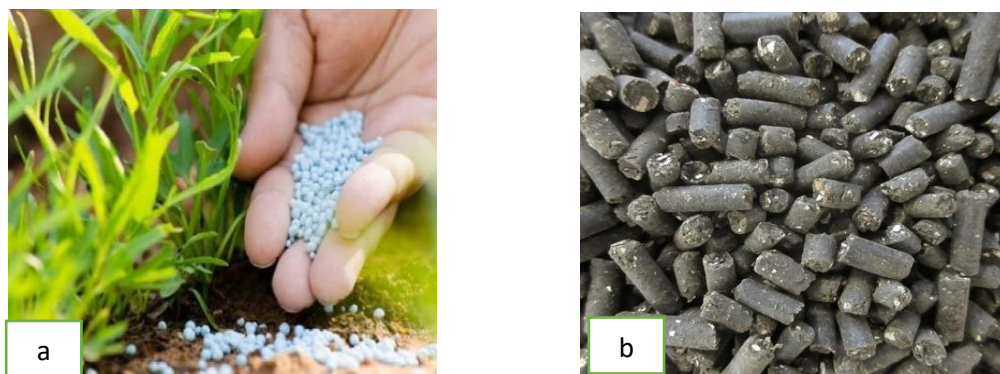


Figure 8 : Types d'engrais (a : Minéraux ; b : Organiques) (Teffahi & Noun, 2021).

3.2. Types de fertilisation

La fertilisation est un processus clé de l'agriculture moderne, permettant d'améliorer la productivité des cultures et de garantir la sécurité alimentaire. Les différents types de fertilisation peuvent être classés en plusieurs catégories : la fertilisation organique, la fertilisation minérale et la fertilisation biologique. Chacune de ces méthodes a ses spécificités, avantages et inconvénients (FAO/OMS, 2015).

3.2.1. Fertilisation organique

La fertilisation organique utilise des matières d'origine naturelle comme, les fumures, les résidus de culture ou les lisiers générés par les installations d'élevage. Ces matières sont caractérisées par une grande variabilité en termes de disponibilité de l'azote et de leur dégradabilité (Khater, 2015). Elles sont également riches en d'autres nutriments tels que le phosphore et le potassium (Sharpley & Moyer, 2000).

3.2.2. Fertilisation minérale

La fertilisation minérale, également appelée chimique, consiste à utiliser des fertilisants synthétiques, généralement sous forme de granulés ou de solutions. Ces fertilisants sont riches en éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Parmi ses avantages, la fertilisation minérale permet de fournir des nutriments rapidement disponibles pour les plantes et offre un contrôle précis des apports nutritifs. Cependant, elle présente également des inconvénients, notamment le risque de pollution des sols et des eaux, ainsi que la possibilité d'entraîner une dépendance et une dégradation de la santé du sol à long terme (Mengel & Kirkby, 2001).

3.2.3. Fertilisation biologique

La fertilisation biologique est une méthode qui exploite des micro-organismes et des substances naturelles pour améliorer la fertilité du sol (Symnaczik *et al.*, 2022). Elle inclut l'utilisation de biofertilisants tels que des bactéries fixatrices d'azote et des champignons. Parmi ses avantages, cette approche contribue à la santé du sol en favorisant la vie microbienne et permet de réduire la dépendance aux engrais chimiques. Toutefois, son efficacité peut varier en fonction des conditions environnementales, et une application correcte nécessite des connaissances techniques appropriées (Rodriguez & Fraga, 1999).

3.3. Eléments minéraux indispensables à la croissance de la plante

Pour assurer sa croissance et son développement, la plante puise et absorbe les éléments essentiels présents dans son environnement (Figure 9). On peut citer le carbone, sous forme de dioxyde de carbone atmosphérique, l'oxygène provenant de l'air et du sol, ainsi que l'eau et les autres nutriments principalement extraits du sol, en plus de la lumière. La plupart des plantes ont besoin de 16 éléments nutritifs (Morot-Gaudry *et al.*, 2009), qui proviennent :

- du CO₂ atmosphérique : Carbone (C) ;
- de l'eau : Hydrogène (H) et oxygène (O) sous forme d'eau (H₂O) ;
- du sol et des engrais minéraux et organiques. Ils sont composés de macroéléments tels que l'azote (NO₃⁻ ou NH₄⁺), le phosphore (H₂PO₄⁻), le potassium (K⁺), le calcium (Ca²⁺), le magnésium (Mg²⁺), le soufre (SO₄²⁻) et d'oligoéléments dont le fer (Fe²⁺ ou Fe³⁺), le manganèse (Mn²⁺), le zinc (Zn²⁺), le cuivre (Cu²⁺), le bore (H₂BO₃⁻), le molybdène (MoO₄²⁻), le chlore (Cl⁻).

Les micronutriments sont généralement présents en quantité suffisante dans le sol et ne doivent être ajoutés que lorsque leur carence est constatée (Teffahi & Noun, 2021).

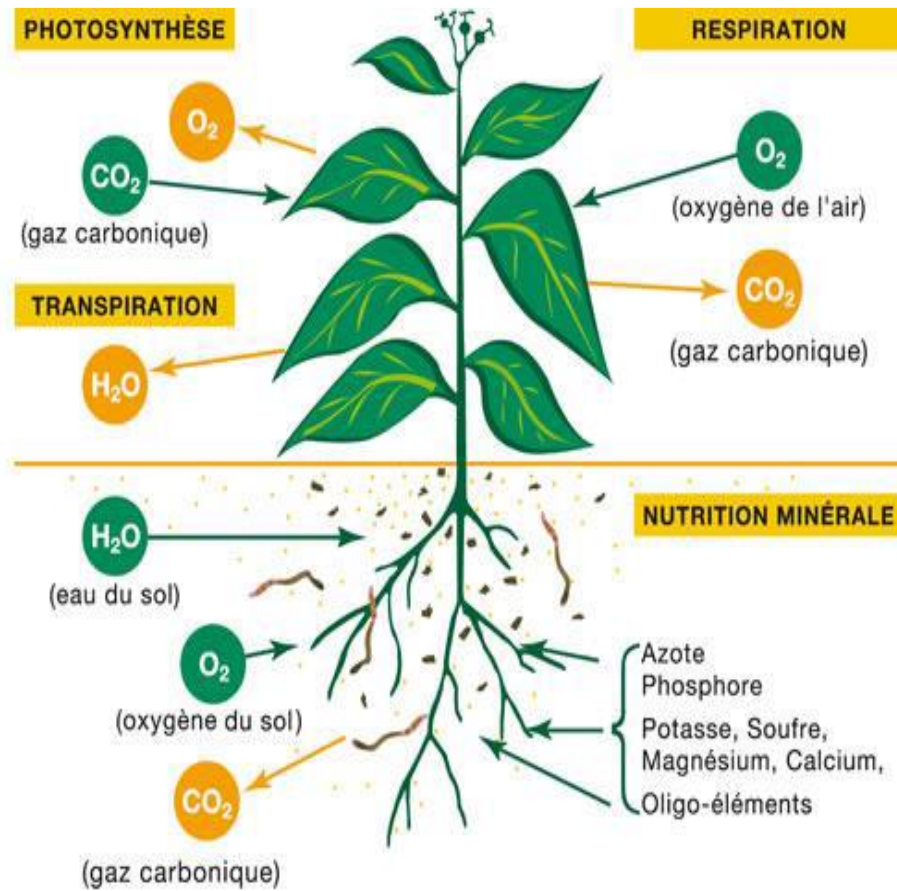


Figure 9 : Nutrition de la plante (Teffahi & Noun, 2021)

3.4. Effets liés à la fertilisation des sols

3.4.1. Augmentation des rendements

Toutes les formes de fertilisation qui apportent de l'azote ont le potentiel d'augmenter la production des cultures végétales. Cependant, il est important de noter que la fertilisation doit être équilibrée pour soutenir cette augmentation de production. Lorsque de l'azote est ajouté, la croissance accrue entraîne également une demande accrue en d'autres nutriments du sol pour répondre aux besoins accrus. Par conséquent, une fertilisation uniquement azotée peut diminuer les concentrations des autres nutriments dans le sol, limitant ainsi la production de biomasse à long terme. La fertilisation organique, quant à elle, a démontré sa capacité à fournir tous les

éléments nécessaires aux processus biophysiques des cultures terrestres (Edmeades, 2003 ; Steiner *et al.*, 2007).

Concernant la fertilisation minérale, elle a un effet potentiellement acidifiant qui peut significativement réduire la disponibilité des éléments nutritifs et donc la production agricole. Pour contrer cet effet, l'utilisation de la fertilisation minérale est souvent accompagnée de techniques de chaulage visant à maintenir le pH du sol à des niveaux adéquats (Kidd *et al.*, 2017). En revanche, la fertilisation organique par exemple à base de lisier et de compost, tend généralement à maintenir, voire à augmenter le pH du sol (Edmeades, 2003 ; Laurent *et al.*, 2020).

En addition, des recherches menées ont démontré que la fertilisation organique conduisait à de meilleures performances à long terme, tant en termes de fertilité du sol que de rendements, par comparaison à la fertilisation minérale (Steiner *et al.*, 2007 ; Hejzman *et al.*, 2010 ; Kidd *et al.*, 2017).

3.4.2. Augmentation des niveaux de carbone

Dans les sols, le stock de carbone est généralement considéré comme constant, avec un équilibre entre les entrées et les sorties de carbone. Les entrées de carbone dans le système proviennent de la matière organique morte comme les litières aériennes ou souterraines. Le carbone, résultant de la minéralisation de la matière organique du sol, peut être libéré dans l'atmosphère sous forme de CO₂ (Rambaut, 2022). En plus des entrées mentionnées, des apports directs de matière organique peuvent être introduits dans le sol, que ce soit par fertilisation ou indirectement par une augmentation de la quantité de litière (Christopher & Lal, 2007 ; Poeplau *et al.*, 2018). Des recherches ont démontré que différents types de fertilisation peuvent augmenter le stock de carbone du sol (Soussana *et al.*, 2010), avec la fertilisation organique étant souvent considérée comme la plus efficace.

3.4.3. Augmentation des gaz à effet de serre

Bien que la fertilisation organique puisse augmenter les rendements et le stock de carbone des sols agricoles, elle peut entraîner une augmentation des émissions de différents gaz à effet de serre (GES) tels que le CO₂, le CH₄ et surtout le N₂O (Baral *et al.*, 2016 ; Petitjean *et al.*, 2019). Le protoxyde d'azote (N₂O) est particulièrement préoccupant en raison de son potentiel radiatif environ 300 fois supérieur à celui du CO₂ (Etminan *et al.*, 2016). Les émissions

de N₂O augmentent avec les pratiques de fertilisation, notamment avec les quantités accrues d'azote appliquées (Davidson & Kanter, 2014).

3.5. Effets des fertilisants sur les paramètres agronomiques et biochimiques des cultures

3.5.1. Effets des fertilisants sur les paramètres agronomiques

Sur les paramètres agronomiques, des effets significatifs des engrais tant organiques que minéraux ont été rapportés. L'effet positif des engrais organiques sur les plantes a déjà été enregistré par plusieurs auteurs (Akanza *et al.*, 2002 ; Ogbonna *et al.*, 2012 ; Biaou *et al.*, 2017 ; Zadi *et al.*, 2018). Akanza *et al.* (2002) ont montré que les fientes de poulets appliquées sur des plants de manioc augmentaient significativement le rendement en racines de manioc en Côte d'Ivoire. De plus, selon l'étude d'Ogbonna *et al.* (2012) sur le maïs, l'utilisation d'engrais organique a favorisé la croissance végétative. Biaou *et al.* (2017) ont obtenu des résultats similaires lorsqu'ils ont appliqué le compost enrichi à la fiente de volaille sur les carottes au Bénin.

Pour les paramètres diamètre au collet, hauteur et nombre de feuilles émises, les plants traités avec l'engrais chimique et ceux traités avec la fiente de poulet ont eu les moyennes les plus élevées ont fait observer Zadi *et al.* (2018) qui travaillaient sur la fertilisation des cocotiers en Côte d'Ivoire. Ces constatations corroborent celles faites par Ognalaga *et al.* (2017), qui ont observé au Gabon une amélioration du développement végétatif et du rendement des plants de manioc lorsqu'ils étaient fertilisés avec de la bouse de vache et de l'urée. Les fientes de poulet, lorsqu'elles sont appliquées à la dose adéquate, pourraient remplacer les engrais chimiques. En effet, une fois bien décomposés, les engrais organiques ont un effet sur les rendements qui est comparable à celui des engrais chimiques (Akanza & Yao-Kouamé, 2011).

En République Centrafricaine, un apport des fumures minérales a été expérimenté afin de pallier la diminution de la fertilité des sols et de rendement des cultures du manioc (Ballot *et al.*, 2016). Dans cette étude, quatre types d'engrais ont été testés : l'urée (Co(NH₂)₂), le sulfate de potassium (K₂SO₄), le chlorure de potassium (KCl) et le triple superphosphate (TSP). Les résultats ont révélé que l'apport d'azote et de phosphore a permis d'accroître de manière très significative le rendement de manioc de 18,70 à 40,20 t.ha⁻¹. De plus, une interaction très significative a été observée entre les apports d'azote (N) et de potassium (K) sur les rendements. L'augmentation progressive des doses de potassium sous forme de chlorure de potassium (KCl)

a eu un effet négatif sur la croissance des plants et le rendement du manioc. L'application des engrais minéraux a donc permis d'améliorer la productivité du manioc (Ballot *et al.*, 2016). Bakayoko *et al.* (2007) ont observé des résultats similaires en appliquant de la litière de volaille et de la fumure bovine sur des sols ferrallitiques sableux moyennement désaturés à Toumodi, au Centre de la Côte d'Ivoire, dans le but d'intensifier la culture du manioc (*Manihot esculenta* Crantz). Après 15 mois de plantation, ces amendements ont significativement augmenté les rendements moyens des variétés de manioc, atteignant 63 t.ha⁻¹ pour la litière de volaille et 61 t.ha⁻¹ pour la fumure bovine comparés à 40 t.ha⁻¹ pour le témoin.

3.5.2. Effets des engrais sur la composition chimique du manioc

L'application de fertilisants apporterait des quantités supplémentaires de minéraux (azote, phosphore, potassium et magnésium) au pool d'éléments déjà existant dans le sol dans le but d'améliorer leur teneur (Mguis & Ksontini, 2005). Par conséquent, les plantes puisant dans le sol les éléments nutritifs dont elles ont besoin, la composition chimique de leurs différents organes se trouvera améliorée. Taffouo *et al.* (2006) ont conduit une étude au Cameroun portant sur les effets des engrais chimiques sur la valeur nutritionnelle des organes végétatifs afin d'identifier la fumure de redressement susceptible de permettre une amélioration de la composition chimique et de la production de matière sèche du manioc (*Manihot esculenta*). Pour ce faire, ces auteurs ont testé quatre (4) types d'engrais [engrais potassique (K), phosphaté (P), phosphaté et potassique (PK) et azoté, phosphaté et potassique (NPK)]. Après 9 mois de culture, les résultats obtenus ont montré que l'apport des solutions nutritives enrichies en K, PK et NPK, a augmenté de façon significative les teneurs en glucides, lipides et protides totaux des feuilles ($p < 0,05$). L'engrais chimique riche en P a accru de 25 % les teneurs en lipides des feuilles. En outre, l'apport de NPK a influencé positivement les quantités de matières sèches produites dans les différents organes de *M. esculenta*. Selon ces auteurs, les teneurs en protides totaux des feuilles et des tubercules cultivés dans le milieu enrichi en NPK ont été très élevées (70 mg/g MS et 30 mg/g MS respectivement) par rapport à celles des plantes témoins (17 mg/g MS et 9 mg/g MS respectivement). L'utilisation de l'engrais composé NPK comme fumure de redressement permettrait donc une amélioration de la composition chimique et de la production de matière sèche des organes du manioc.

Généralités

Dans un contexte d'économie circulaire, l'utilisation de déchets issus des fabriques de production d'*attiéké* dans la culture du manioc serait la bienvenue. Les travaux de Kpata-Konan *et al.* (2019) portant sur la production de biogaz ont révélé qu'en plus de ce produit, il subsiste un autre qui est le digestat, résidu de la méthanisation d'effluents de manioc. Ce digestat présente des caractéristiques lui permettant d'être utilisé sous forme d'engrais biologique dans des cultures. Nitidae (2020) a confirmé l'utilisation du digestat d'effluents dans la production de concombre et de haricot vert en Côte d'Ivoire. Leur utilisation dans la production de ces légumes a permis d'améliorer les rendements de l'ordre de 11,27 à 13,3 % respectivement pour le haricot vert et les concombres. Concernant leur application dans la culture du manioc ainsi que leurs effets sur les produits dérivés, il y a une insuffisance de données.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

L'expérience au champ s'est déroulée dans la proximité du village de Zepréghué, situé dans la ville de Daloa au centre-ouest de la Côte d'Ivoire, dans la région administrative du Haut-Sassandra. La zone d'étude, aux coordonnées 6,8883°N et 6,4397°W, se trouve dans un climat de type tropical, avec une saison très chaude et sèche de novembre à février, suivie d'une saison pluvieuse de mars à octobre. Elle est caractérisée par une végétation composée de forêts denses et de savanes humides (Figure 10). Les diagrammes ombrothermiques de cette région allant de l'année 2020 à 2023 sont présentés sur la figure 11. La température moyenne oscille entre $26,96 \pm 1,27$ et $27,36 \pm 0,93$ °C. Sur la période d'étude, les pluviosités annuelles ont varié entre 847,88 et 1543,56 mm (Anonyme 2, 2024). Par ailleurs, les échantillons de sol prélevés sur ce site sont de texture argileuse et présentent comme principales caractéristiques une teneur élevée en phosphore et une faible teneur en azote (Tableau V).

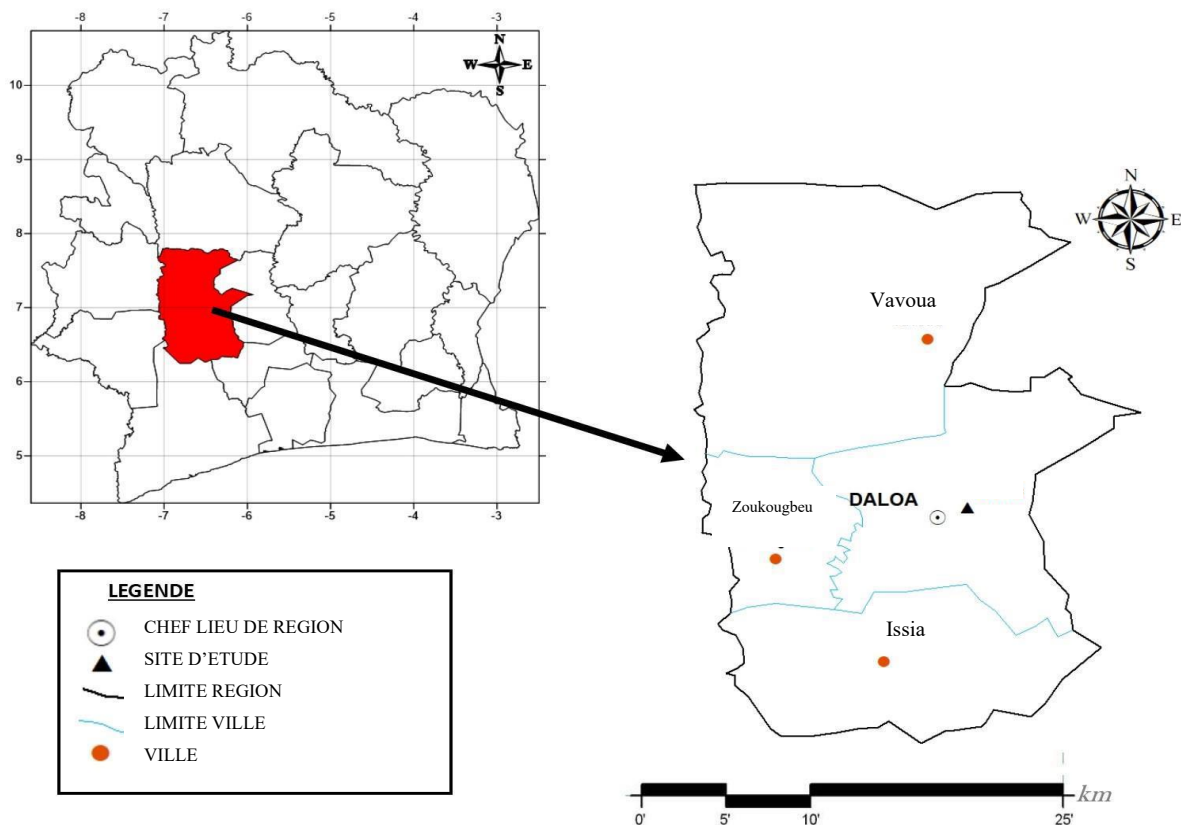
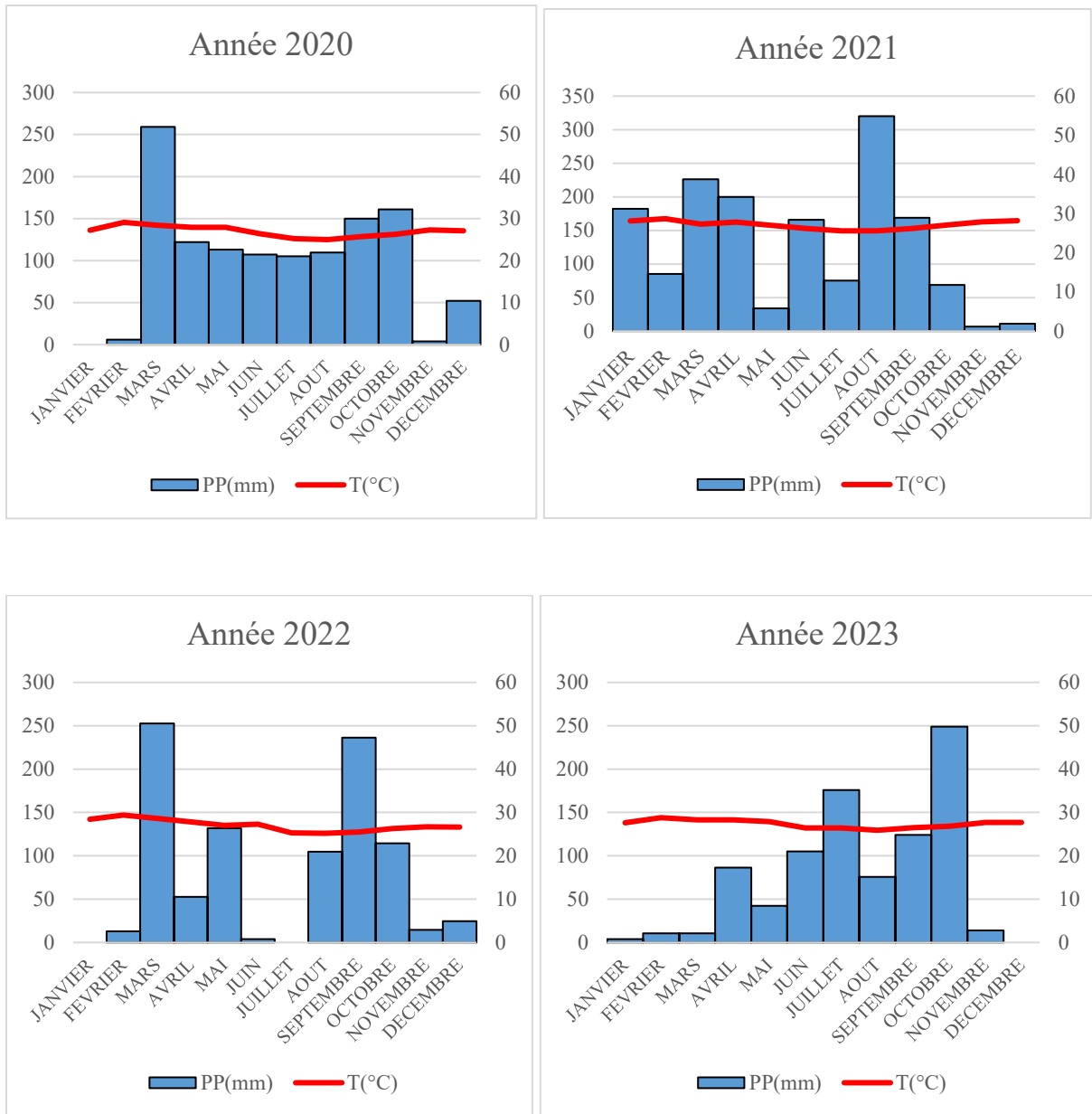


Figure 10 : Présentation du site d'étude



PP(mm) : Précipitations totales de pluie en millimètre ; T(°C) : Température moyenne en degré Celsius.

Figure 11 : Diagrammes ombrothermiques de la région de Daloa de 2020 à 2023 (Anonyme 2, 2024)

Tableau V : Caractéristiques physico-chimiques de sols du site d'étude

Eléments	Teneurs
Argile (%)	53,41± 0,18
Limon (%)	25,23 ± 0,11
Sable (%)	21,38 ± 0,27
pH	5,90 ± 0,30
CEC (cmol/kg)	4,72 ±0,22
C/N	14,40 ± 0,61
MO (g/kg)	17,35 ± 0,70
N _{total} (g/kg)	0,70 ± 0,02
C _{total} (g/kg)	10,08 ± 04
K échangeable (mg/kg)	233,70 ±0,26
P échangeable (g/kg)	117,28 ± 0,03

MO : Matière organique ; CEC : Capacité d'échange cationique ; N : Azote ; P : Phosphore ; K : Potassium ; C : Carbone ; C/N : Rapport carbone sur azote

2. MATERIEL

2. 1. Matériel biologique

Le matériel biologique était composé de digestat liquide (Figure 12) provenant de la méthanisation des effluents de manioc, de la bouse de vache et de l'urine humaine. Ce digestat a été obtenu après la production de biogaz sur le site de fabrication d'*attiéké* du projet VECDA (Valorisation énergétique des effluents issus des fabriques d'*attiéké* et appui à sa conservation durable) à Daloa (Région du Haut-Sassandra, Côte d'Ivoire) durant une période de trois mois. Au total, une quantité de 6000 L de digestat a été collectée à raison de 500 L par semaine et conditionnée dans des fûts de 2000 L.

Pour l'expérimentation agricole, des boutures de manioc de la variété culturale Yacé, provenant d'une exploitation agricole spécialisée dans la production de boutures situé à Zoboua (Daloa) ont été utilisées (Figure 13).

En outre, des échantillons de racines fraîches de manioc récoltées 12 mois après la plantation ont été utilisés (Figure 14). Ils provenaient, d'une part, de plante de manioc ayant été traité par un digestat d'effluent de manioc dans le cadre d'un processus continu, et d'autre part, de plantes de manioc témoins, non traitées. Ces échantillons de racines de manioc de la variété Yacé ont fait l'objet d'une caractérisation avant d'être transformés en *attiéké* (Annexe 2). Les racines de manioc utilisées pour la production d'*attiéké* ont été cultivées dans les mêmes conditions pédoclimatiques.



Figure 12 : Echantillons de digestats

- P1 : Echantillon de digestat collecté durant le premier mois de production ;
- P2 : Echantillon de digestat collecté durant le deuxième mois de production ;
- P3 : Echantillon de digestat collecté durant le troisième mois de production.



Figure 13 : Boutures de manioc de la variété Yacé pour la culture



Figure 14 : Racines fraîches de manioc

2.2. Matériel fertilisant

Le matériel de fertilisation était composé de digestat d'effluents de manioc et des engrais minéraux achetés auprès de commerçants installés dans le grand marché de la ville de Daloa, à la suite d'une enquête préliminaire. Cette enquête a permis de retenir trois (3) types :

- engrais minéraux (E) de type NPK de composition 20-15-15 ;
- engrais minéraux (F) de type NPK de composition 4-3-12 ;
- engrais minéraux (G) de type NPK de composition 7-21-7.

2.3. Matériel technique

Le matériel technique comprenait des équipements destinés aux caractérisations physicochimiques et agronomiques des échantillons, ainsi que des appareils de pulvérisation et du matériel de laboratoire. Quelques photographies de ce matériel sont présentées en annexe 1. Par ailleurs, un digesteur enterré en forme de dôme a été utilisé pour la digestion anaérobie des intrants. Il s'agit d'un système de production de digestat et de biogaz à partir des matières organiques. Il est composé d'un dôme enterré d'une capacité de 10 m³, équipé d'un système d'alimentation manuel et d'une zone de recueil du digestat (Figure 15). Cette dernière zone est constituée d'un point de transit du digestat et de deux fosses de stockage (Figure 16). Les

différentes étapes de la construction de ce digesteur sont présentées en annexe 3. Enfin, une fiche de dégustation des échantillons d'*attiéké* a été utilisée pour l'évaluation sensorielle (Annexe 4).



Figure 15 : Digesteur en construction



Figure 16: Différents compartiments du digesteur incluant les fosses de stockage du digestat en fin de construction

3. METHODES

3.1. Détermination des valeurs qualitatives du digestat issu d'un digesteur continu des effluents de manioc

3.1.1. Production du digestat

Des effluents de manioc, de l'urine humaine et de la bouse de vache ont été utilisés pour la production du digestat. Concernant l'effluent de manioc, il provenait de l'activité des productrices installées sur le site du projet VECDA. Il est constitué d'eau de lavage des pulpes obtenues après l'épluchage des racines de manioc et du liquide issu du pressage de la pâte de manioc fermenté. Pour l'urine, elle a été collectée à travers les urinoirs et les toilettes sèches à déviation d'urine (TSDU) installés dans la ville de Daloa (au niveau des marchés, des maquis, des restaurants et de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE). Concernant la bouse de vache, elle était issue de l'abattoir de la ville de Daloa. Après la collecte des intrants, l'alimentation du digesteur a été effectuée.

Initialement, le digesteur enterré a été alimenté avec de la bouse de vache et de l'eau afin d'ensemencer le milieu réactionnel et initier la production de biogaz. Par la suite, de l'urine humaine a été ajoutée aux effluents de manioc collectés afin de neutraliser leur pH. Pour cela, une quantité d'urine correspondant aux 2/3 du volume de l'effluent à traiter a été utilisée. Une fois la neutralisation terminée, le mélange obtenu (200 L) est introduit dans la zone d'alimentation du digesteur, d'où il s'écoulera jusqu'au fond par le biais du tuyau d'alimentation. Le mélange ajouté propulse le digestat produit vers la sortie via les fosses conçues à cet effet. Le renouvellement de l'effluent neutralisé a lieu tous les trois jours, avec un volume constant de 200 L.

3.1.2. Echantillonnage des digestats

Trois productions de digestat ont été réalisées au bout de trois mois, à raison d'une production par mois. Par production, trois échantillons de digestat ont été prélevés dans des bidons d'une capacité de 25 L. Ces échantillons ont été soigneusement étiquetés puis utilisés pour les analyses physico-chimiques et microbiologiques.

3.1.3. Analyses physico-chimiques des digestats

3.1.3.1. Détermination du pH

Le pH a été mesuré avec un multimètre numérique (YK-2001PHA, Taïwan) en suivant la méthode AOAC (1990). L'appareil de mesure préalablement calibré, a été mis sous tension et ensuite sa sonde a été plongée dans 60 mL d'effluent. La valeur du pH est obtenue sur l'écran d'affichage.

3.1.3.2. Demande chimique en oxygène (NF T90-101, 2021)

Le dosage de la demande chimique en oxygène (DCO) a été réalisé après une minéralisation qui s'est déroulée en milieu acide sous l'action du dichromate de potassium. Les matières organiques contenues dans l'échantillon de digestat sont oxydées par le dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) et l'excès de dichromate de potassium est titré par une solution de sulfate de fer II ($FeSO_4$). Une quantité de 10 mL d'une prise d'essai à analyser a été introduite dans un ballon à DCO. Puis, de l'acide sulfurique, une solution de dichromate de potassium et de sulfate de mercure II ($HgSO_4$) et une solution d'acide sulfurique et de sulfate d'argent y ont été ajoutés. Le tout a été porté à ébullition à 150 °C pendant 2 heures. Après ce temps, l'échantillon a été refroidi et complété à 75 mL avec de l'eau distillée. Après refroidissement, l'ensemble a été titré avec une solution de sulfate de fer II et d'ammonium en présence de 1 ou 2 gouttes d'indicateur à la ferroïne.

La demande chimique en oxygène (DCO), exprimée en milligrammes par litre, a été calculée selon la formule 1 :

$$DCO = 8000 \times C \times (V_1 - V_2) / V_0 \quad (1)$$

Avec

C : Concentration de la solution de sulfate de fer II et d'ammonium (mol/L) ;

V_0 : Volume de la prise d'essai (mL) avant dilution éventuelle ;

V_1 : Volume de sulfate de fer II et d'ammonium (mL) utilisée pour l'eau distillée ;

V_2 : Volume de sulfate de fer II et d'ammonium (mL) utilisée pour l'échantillon.

3.1.3.3. Demande biochimique en oxygène DBO₅ (NF EN ISO 5815-1, 2019)

La mesure de la DBO₅ a été faite selon la méthode manométrique fondée sur le principe du respiromètre de WARBURG. Cette méthode permet de quantifier directement la respiration de la biomasse à l'aide d'un dispositif spécialisé. Un volume d'échantillon de 43,5 mL a été versé dans une bouteille d'incubation de 300 mL et fermée avec un bouchon muni d'un capteur de pression (Oxitop). Il y a été ajouté ensuite une pincée de l'allyle thio-urée. En addition, deux (2) pastilles d'hydroxyde de potassium ont été introduites dans chaque bouchon intérieur (noir). L'appareil de mesure, de type IS 6, a été placé dans un réfrigérateur maintenu à 20 °C. Tous les jours pendant 5 jours pour la DBO₅, la consommation d'oxygène a été suivie. Celle-ci s'est traduite par une diminution de la pression d'air. La mesure est corrigée à l'aide d'un facteur

correctif qui dépend de la quantité d'échantillon prélevée et de la gamme de mesure souhaitée. La relation 2 a été utilisée pour calculer la valeur de la DBO₅ en mg O₂ /L :

$$\text{DBO}_5 = ((P_0 - P_5) - (K_0 - K_5)) \times V/E \quad (2)$$

Avec

P₀ : Concentration d'O₂ dans la dilution au début de l'essai ;

P₅ : Concentration d'O₂ dans la dilution à la fin de l'essai (après 5 jours) ;

K₀ : Concentration d'O₂ dans l'eau de dilution au début de l'essai ;

K₅ : Concentration d'O₂ dans l'eau de dilution à la fin de l'essai (après 5 jours) ;

V : Volume du flacon ;

E : Prise d'essai.

3.1.3.4. Azote total (NF EN 25663, 1994)

L'azote total Kjeldahl (NTK) est un terme qui désigne la mesure qui prend en compte l'azote organique total, l'ammoniac (NH₃), et l'ammonium organiques (NH₄⁺) dans un échantillon donné. Cette détermination se déroule en trois étapes : une minéralisation de l'azote organique en azote ammoniacal, une distillation et un titrage.

Au niveau de la minéralisation, un volume de 50 mL d'échantillon a été introduit dans un tube à minéralisation (matras) auquel ont été ajoutés 1 g de catalyseur de minéralisation (sélénium + sulfate de potassium) et 10 mL d'acide sulfurique (94 - 98 %). L'ensemble a été porté à 350 °C pendant deux heures sous la hotte. A la fin du temps de chauffage, les tubes ont été refroidis à la température ambiante (25 °C). Après refroidissement, l'acide a été neutralisé par un ajout de 50 mL de soude à 40 % et le mélange obtenu a été placé dans le réservoir du distillateur. Avant la mise en marche du distillateur, l'allonge du réfrigérant a été plongé dans un erlenmeyer contenant 20 mL d'acide borique additionné d'indicateur mixte (rouge de méthyle et bleu de méthylène). La distillation a été effectuée pendant 10 minutes au bout desquelles la solution vire au vert.

Le titrage du distillat a été effectué avec l'acide sulfurique 0,1 N et la fin du dosage est indiqué par le retour à la coloration violette. Le volume de l'acide sulfurique (0,1 N) utilisé a été relevé. La teneur en azote a été calculée à partir de l'équation 3 suivante :

$$\text{NTK} = [(V_1 - V_0) \times N \times 14 \times 1000] / V_2 \quad (3)$$

Avec

V₀ : Volume de H₂SO₄ utilisé pour titrer le témoin (eau distillée) ;

V_1 : Volume de H_2SO_4 utilisé pour titrer l'échantillon ;

V_2 : Volume de l'échantillon prélevé ;

N : Normalité de H_2SO_4 (0,1 N) ;

14 : Masse atomique de l'Azote.

3.1.3.5. Dosage du Carbone Organique Total (COT)

L'analyse du COT a été effectuée avec un multimètre de marque Analytik Jena Multi N/C 3100 selon la norme NF T90-102 (1997). Les échantillons sont analysés par détection infrarouge et la teneur est quantifiée par comparaison à une courbe d'étalonnage. La concentration en carbone d'un échantillon a été calculée en utilisant l'équation de la droite d'étalonnage.

Les résultats sont obtenus directement à partir du logiciel d'analyse. Ils sont exprimés en mg C /L d'après l'équation 4 :

$$C = A \times F \quad (4)$$

Avec

C : Concentration du carbone dans l'échantillon (mg C /L) ;

A : Concentration du carbone dans la solution dosée (mg C /L) ;

F : Facteur de dilution, si nécessaire.

3.1.3.6. Dosage des minéraux

Les concentrations en éléments minéraux ont été quantifiées par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS) (Coulibaly *et al.*, 2023). Les résultats ont été obtenus directement via le logiciel Qtegra, en utilisant une régression linéaire basée sur la réponse des étalons.

3.1.4. Analyses microbiologiques du digestat

3.1.4.1. Préparation des milieux de culture et diluants

3.1.4.1.1. Gélose lactosée biliée au cristal violet et au rouge neutre (VRBL)

Pour la préparation du milieu VRBL (Condalab, Espagne), une quantité de 100,12 g du milieu a été prélevée et mise dans 250 mL d'eau distillée stérile. L'ensemble a été homogénéisé et mis à ébullition à 100 °C pour la dissolution, puis refroidi à 45-50 °C. Environ 20 mL du milieu ont été par la suite coulés dans des boîtes de Pétri puis laissés refroidir pour la solidification. Ce milieu est sélectif pour les coliformes. Les colonies caractéristiques sont généralement rouge violacé, souvent entourées d'un halo rouge.

3.1.4.1.2. Gélose Baird Parker

Une quantité de 16,57 g de poudre du milieu Baird Parker (ALPHA Biosciences, USA) a été pesée et mise en suspension dans 250 mL d'eau distillée. L'ensemble a été bien homogénéisé et mis au bain marie à 100 °C pour la surfusion, avant d'être mis à l'autoclave à 121 °C pour la stérilisation. Le milieu a été refroidi à environ 45-50 °C puis du jaune œuf tellurite de potassium a été ajouté avant d'être coulé dans des boîtes de Pétri en raison de 20 mL par boîte. Ce milieu est sélectif pour les staphylocoques. Les colonies caractéristiques de *Staphylococcus* sp. apparaissent noires ou gris foncé, entourées d'un halo partiellement opaque.

3.1.4.1.3. Gélose de Mossel

Une quantité de 12,36 g du Gélose de Mossel (Merck Millipore, Allemagne) a été pesée et mise en suspension dans 250 mL d'eau distillée. L'ensemble a été homogénéisé et placé au bain marie pour la surfusion. Le tout a été stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes. Une fois stérilisé, le milieu a été refroidi à environ 45-50 °C puis du jaune d'œuf y a été ajouté. Le milieu a été coulé dans des boîtes de Pétri en raison de 20 mL par boîte. Ce milieu est sélectif pour les bactéries du genre *Bacillus*. Les colonies présumées de *Bacillus* sp. apparaissent de couleur rose et sont généralement entourées d'un halo de précipité.

3.1.4.1.4. Gélose Rapid *E. coli* 2

Une quantité de 9,25 g de Gélose Rapid *E. coli* 2 (BioRad, France), a été mise en suspension dans 250 mL d'eau distillée et mélangée jusqu'à l'obtention d'une suspension homogène. Pour faciliter la dissolution, un chauffage a été fait au bain marie. L'ensemble a été stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes. Après refroidissement à environ 45-50 °C, le milieu est coulé dans des boîtes de Pétri puis laissé à la température ambiante pour la solidification. Ce milieu est sélectif pour le groupe des *Escherichia*. Les colonies caractéristiques apparaissent de couleur violette à rose.

3.1.4.1.5. Gélose Tryptone-Sulfite-Cycloserine (TSC)

Pour la préparation de la gélose TSC (BioRad, France), une masse de 42,0 g de poudre du milieu a été pesée et mise en suspension dans 1 L d'eau distillée. Un mélange a été effectué jusqu'à ce que la suspension soit homogène. Le tout est mis au bain marie pour la surfusion, puis stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes. Le milieu a été refroidi à environ 44-47 °C, coulé dans des tubes à essais et laissé à la température ambiante pour la solidification.

Ce milieu est sélectif pour les bactéries du groupe des anaérobies sulfito-réducteurs (ASR), y compris *Clostridium* sp. Les colonies caractéristiques apparaissent de couleur noire.

3.1.4.1.6. Gélose Hektoen

La gélose Hektoen (Condalab, Espagne) a été préparée en dissolvant une quantité de 75 g dans 1 litre d'eau distillée stérile. L'ensemble est mis au bain marie à 60 °C jusqu'à dissolution total. Le milieu a été coulé dans des boîtes de Petri en raison de 20 mL par boîte pour la recherche de *Salmonella*.

3.1.4.1.7. Gélose Rappaport Vassiliadis

Pour la préparation du bouillon Rappaport Vassiliadi (Oxiod, Royaume-Uni), une quantité de 26,75 g du milieu déshydraté a été prélevée et dissoute dans 1 litre d'eau distillée. L'ensemble est chauffé jusqu'à dissolution total puis reparti dans des tubes à vis en raison de 10 mL par tube. Les tubes sont par la suite mis à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes pour la stérilisation. Ce milieu a été utilisé pour l'enrichissement lors de la recherche de salmonella.

3.1.4.1.8. Eau peptonée tamponnée (EPT)

Pour la préparation de l'Eau peptonée tamponnée (Condalab, Espagne), une masse de 9,5 g du milieu a été pesée puis dissoute dans 1 litre d'eau distillée. La suspension obtenue a été stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes. Ce milieu a été utilisé pour la préparation des suspensions mères et des dilutions décimales.

3.1.4.2. Préparation des suspensions mères et dilutions successives

Un volume de 10 mL d'échantillon a été prélevé aseptiquement dans un stomacher, auquel sont ajoutés 90 mL de diluant stérile. Le mélange ainsi obtenu a été homogénéisé pendant deux (02) minutes. Cette suspension correspond à la solution mère. Des dilutions subséquentes ont été ensuite effectuées jusqu'à 10^{-8} lorsque nécessaire. Les dilutions ont été réalisées en mélangeant un volume de 1 mL de la solution mère avec 9 mL d'eau peptonée Tamponnée suivi d'une homogénéisation, ce qui correspond à la dilution 10^{-1} . Des dilutions décimales successives ont par la suite été réalisées. Ainsi chaque fois, un (01) mL de la dilution précédente est dilué dans 9 mL d'eau peptonée Tamponnée. De cette manière, des dilutions de 10^{-1} à 10^{-8} ont été obtenues.

3.1.4.3. Ensemencement et dénombrement des microorganismes

Tous les milieux retenus ont été ensemencés en surface excepté les milieux VRBL et TSC qui ont été ensemencés respectivement dans la masse dans des boîtes de Pétri et en profondeur dans des tubes en raison de 1 mL de la solution. Les dilutions retenues ont été utilisées. Concernant les autres milieux, l'ensemencement s'est fait par étalement de 0,1 mL de la solution sur la boîte de Pétri contenant des géloses préalablement préparées et stériles. Cette opération a été répétée afin d'obtenir pour chaque dilution, deux (2) boîtes de Pétri. Après solidification des boîtes autour du bec bunsen, elles ont été incubées à l'étuve à 37 °C pendant 48 heures pour les Staphylocoques et les *Clostridium* sp, 30 °C pour les coliformes totaux et les *Bacillus* pendant 24 à 48 h, 44 °C pour les *Escherichia* sp pendant 24 à 48 h et 46 °C pour les ASR pendant 24 h. Seules les boîtes comprenant entre 15 et 300 colonies caractéristiques des germes à dénombrer ont été considérées.

La recherche de *Salmonella* est basée sur sa présence ou non dans un échantillon. Elle a été réalisée selon les étapes séquentielles du pré-enrichissement et de l'enrichissement de l'échantillon, suivies de l'isolement. La recherche de *Salmonella* a été faite après un pré-enrichissement qui a consisté en l'ensemencement de 25 mL d'échantillon dans 225 mL d'eau peptonée tamponnée (EPT) suivie d'une incubation à 37 °C pendant 24 heures. Cette étape a été suivie d'un enrichissement du bouillon de culture à l'aide du milieu sélectif Rappaport Vassiliadis (RV). Ainsi, une quantité de 0,1 mL du bouillon de culture obtenu après le pré-enrichissement a été transféré dans 10 mL du milieu Rappaport Vassiliadis (RV). Le milieu a été incubé à une température de 42 °C durant 24 h. Le milieu a été incubé à une température de 37 °C durant 24 h. L'isolement des souches a été réalisé sur le milieu Hektoen incubé à 37 °C pendant 24 heures. Les colonies caractéristiques sont des colonies vertes ou bleues à centre noir.

3.1.4.4. Expression des résultats

Le calcul du nombre de microorganismes par millilitre d'échantillon (UFC/mL) à partir du nombre de colonies obtenues dans les boîtes de Pétri choisies a été réalisé grâce à l'équation 5 conformément à la norme NF EN ISO 7218 (2024).

$$N = \frac{\Sigma C}{V \times (N_1 + 0,1N_2) \times d} \quad (5)$$

Avec

N : Nombre total de germes exprimé en unité formant colonie/mL ;
 ΣC : Somme des colonies dans les boîtes considérées ;

- d** : Facteur de dilution ;
- V** : Volume d'inoculum ensemené ;
- N₁** : Nombre de boîtes retenues à la première dilution ;
- N₂** : Nombre de boîtes retenues à la seconde dilution.

3.1.5. Analyses statistiques

L'exploitation statistique des résultats a été effectuée à l'aide du logiciel STATISTICA 7.1. L'analyse de la variance à un facteur (ANOVA) et le test de LSD de Fisher ont été effectués pour comparer les variables analysées. Les différences ont été considérées significatives pour les valeurs de $p \leq 0,05$. Par ailleurs, des techniques exploratoires multivariées ont été appliquées sur les données. Ainsi, une analyse en composantes principales a été effectuée. Ces techniques ont eu pour objectifs d'une part, de regrouper des traitements en tenant compte des similarités d'autre part, de visualiser les individus.

3.2. Optimisation du rendement en racines fraîches de manioc par la méthodologie des surfaces de réponse

3.2.1. Mise en place des parcelles expérimentales et gestion des opérations sur le terrain

L'expérience a été menée sur une parcelle qui avait été nivelée un an auparavant lors d'un lotissement. Une visite préliminaire a été effectuée pour vérifier l'uniformité de la parcelle, confirmant l'absence de pentes ou d'autres gradients d'hétérogénéité visibles. Ensuite, la parcelle a été subdivisée en 13 unités expérimentales, chacune correspondant à un traitement spécifique. Sur chaque unité expérimentale, 16 boutures de manioc de la variété Yacé ont été plantées en suivant l'itinéraire technique, qui préconise un espacement de 1 m entre les boutures en largeur et en longueur. Les traitements ont été assignés de manière aléatoire aux différentes unités expérimentales. Le premier épandage des différents dosages de digestat a débuté sur des plantes âgées de trois mois. Il a été suivi par un deuxième épandage un mois après. Le troisième et dernier épandage a été effectué un mois après le deuxième. Au total, trois épandages des différents dosages ont été réalisés. Il est important de souligner que quatre sarclages ont été effectués jusqu'à la récolte des racines.

3.2.2. Evaluation du rendement en racines de manioc

Le rendement a été évalué sur chaque unité expérimentale selon la formule 6 décrite par Kouadio *et al.* (2023) :

$$\text{Rdt (t/ha)} = \text{DP} \times \text{MF} \quad (6)$$

Avec

Rdt : Rendement en racines fraîches (t/ha) ;

MF : Quantité moyenne de racines fraîches par plant exprimée en tonnes ;

DP : Densité de plantation (10 000 plants/ha).

3.2.3. Élaboration de la méthodologie des surfaces de réponses : plan composite centré

3.2.3.1. Inventaire des variables et réponses

Deux variables ont été sélectionnées : la concentration ou le taux de dilution (en pourcentage) et le volume (en litres) du digestat à appliquer par plant de manioc. Le rendement en racines de manioc (tonnes/ha) enregistré à l'issue de l'expérimentation a constitué la réponse.

3.2.3.2. Identification du domaine expérimental

Le plan composite centré définit 5 niveaux codés pour chaque facteur, délimités entre $-\alpha$ et $+\alpha$. Ces niveaux sont $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$ et $+\alpha$ (Adjoumani, 2021). Pour les deux variables étudiés, α est pris égale à 1,414. La formule (7) rapportée par Feinberg (1996) a été utilisée pour déterminer les valeurs des différents niveaux :

$$x_k = x_{\text{centre}} + z_k \times [(x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) / (z_{\text{max}} - z_{\text{min}})] \quad (7)$$

Avec : $x_{\text{centre}} = (x_{\text{max}} + x_{\text{min}})/2$

x_k : Valeur naturelle d'un niveau k

z_k : Valeur codée d'un niveau k

x_{centre} : Valeur naturelle pour le niveau central

x_{min} : Valeur naturelle pour le niveau minimum

x_{max} : Valeur naturelle pour le niveau maximum

z_{max} : Valeur codée correspondant à $+1,414$

z_{min} : Valeur codée correspondant à $-1,414$

Les valeurs obtenues ont constitué le domaine expérimental (Tableau VI).

Tableau VI : Valeurs des différents niveaux de facteurs

Facteurs	Niveaux Z				
	-1,414	-1	0	+1	+1,414
X ₁	25	35,98	62,5	89,02	100
X ₂	0,50	0,72	1,25	1,78	2

X₁ : Taux de dilution du digestat (%) ; X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant de manioc.

3.2.3.3. Etablissement du tableau d'expérimentation

Trois catégories d'essais ont constitué le plan utilisé (Tableau VII). Il s'agit de :

- 4 essais factoriels constitués d'essais avec les niveaux -1 et +1 en valeurs codées ;
- 4 essais en étoile qui sont des points expérimentaux situés à une distance notée α du centre du domaine expérimental ;
- 5 essais au centre du domaine (Feinberg, 1996). Pour ces essais, la valeur codée des facteurs est prise égale à zéro (Adjoumani, 2021).

En somme, 13 essais correspondant aux différents dosages de digestats ont été réalisés. Ces essais ou dosages ont été attribués aux unités expérimentales précédemment préparées, de manière aléatoire. Plusieurs dilutions de digestat ont été effectuées en tenant compte des différents dosages (Tableau VII). En outre, chaque dosage du digestat comprend un pourcentage de dilution et un volume à répandre par plant de manioc.

Tableau VII : Tableau d'expérimentation

Essais	Valeurs codées		Valeurs réelles	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	-1	-1	35,98	0,72
2	+1	-1	89,02	0,72
3	-1	+1	35,98	1,78
4	+1	+1	89,02	1,78
5	-1,414	0	25	1,25
6	0	-1,414	62,5	0,5
7	+1,414	0	100	1,25
8	0	+1,414	62,5	2
9	0	0	62,5	1,25
10	0	0	62,5	1,25
11	0	0	62,5	1,25
12	0	0	62,5	1,25
13	0	0	62,5	1,25

X₁ : Taux de dilution du digestat (%) ; X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant de manioc.

3.2.3.4. Détermination des coefficients du modèle postulé

L'équation du modèle postulé pour le plan central composite à deux facteurs (X_1 et X_2) est polynomiale de second degré. Cette équation est la suivante :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 \quad (8)$$

Où a_0 , a_1 , a_2 , a_{12} , a_{11} et a_{22} , sont les coefficients du modèle ; X_1 , le taux de dilution du digestat et X_2 , le volume du digestat à répandre par plant ; Y , le rendement en racines de manioc.

Une régression linéaire multiple a été effectuée avec le logiciel Design Expert 13 pour déterminer les valeurs des coefficients du modèle.

3.2.3.5. Détermination des paramètres de qualité du modèle

La qualité du modèle a été déterminée à l'aide du coefficient de détermination R^2 , de la significativité de l'ANOVA et du pourcentage de déviation (%D). Par ailleurs, des tests de normalité des résidus ont également été réalisés. Pour le calcul du taux de déviation, l'équation 9 a été utilisé :

$$D(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_{iexp} - Y_{ipred}|}{Y_{iexp}} \quad (9)$$

Avec

Y_{iexp} : Rendement observé pour l'essai i ;

Y_{ipred} : Rendement prédit par le modèle pour l'essai i

N : Nombre d'essais

3.2.3.6. Détermination des conditions optimales d'épandage du digestat

A partir de l'équation du modèle obtenu, des graphes illustrant les surfaces de réponses et les courbes d'isoreponses ont été réalisés grâce au logiciel STATISTICA 7.1. En outre, le Solveur d'Excel avec l'algorithme GRG a été utilisé pour confirmer les valeurs optimales de concentration de digestat et de volume à répandre par plant de manioc lors de l'épandage.

3.2.3.7. Tests de contrôle

Pour valider le modèle, des tests de contrôle ont été réalisés. Pour ce faire, les conditions optimales identifiées ont été utilisées. Au total, trois essais ont été effectués. Les résultats

obtenus ont été comparés aux valeurs prédites par le modèle afin d’apprécier les écarts entre ces valeurs. La statistique utilisée à cet effet a été le taux de déviation.

3.3. Détermination des effets du digestat issu de méthanisation sur les paramètres agronomiques et physico-chimiques des racines de manioc

3.3.1. Dispositif expérimental

L’essai a été mené avec un dispositif en bloc aléatoire complet avec un facteur étudié : les fertilisants. Le facteur Fertilisants comportait cinq (5) modalités (C, E, F, G et H) :

- le digestat d’effluents de manioc avec un dosage optimal (déterminé dans la section 3.2), noté C ;
- un engrais chimique de type NPK 20-15-15, noté E ;
- un engrais chimique de type NPK 4-3-12, noté F ;
- un engrais chimique de type NPK 7-21-7, noté G ;
- le témoin sans fertilisant, noté H.

Par ailleurs, le dispositif était constitué de trois (3) blocs (Figure 17A). Au total, il renfermait 15 unités expérimentales à raison de cinq (5) unités par bloc. Les traitements ont été affectés de manière aléatoire aux unités expérimentales dans chaque bloc. En outre, les blocs contigus étaient espacés de 1 m tout comme les sous-blocs. Il est à souligner qu’une unité expérimentale contenait 66 pieds de manioc (Figure 17B).

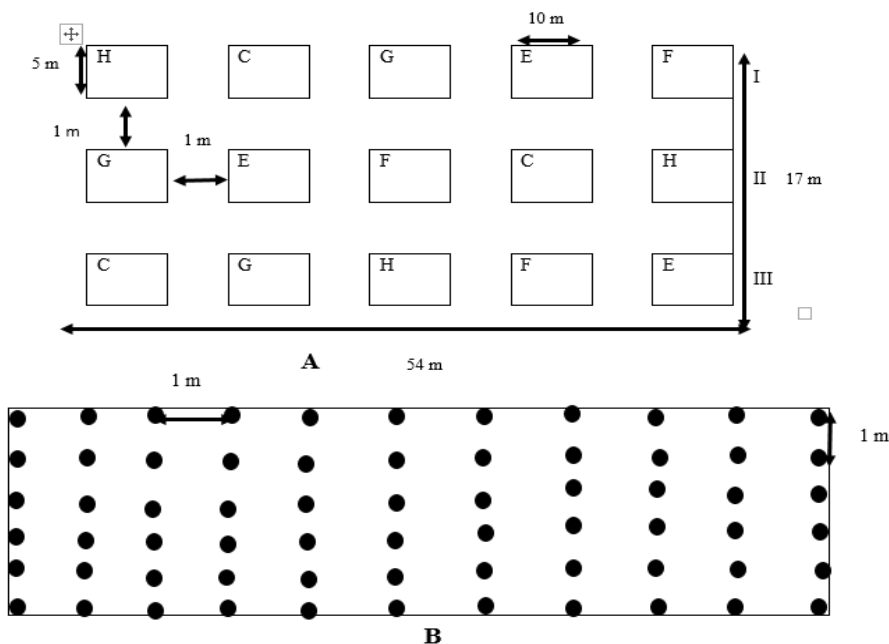


Figure 17 : Dispositif expérimental

- A** : Affectation aléatoire des traitements (C, E, F, G et H) aux unités expérimentales dans les blocs ;
B : Présentation d’une unité expérimentale comportant 66 jeunes plants ;
 ● : Jeunes plants de manioc.

3.3.2. Préparation des engrais

Les engrais sont constitués du digestat issu de l'effluent de manioc pour l'engrais biologique et des engrais minéraux solubles dans l'eau pour l'engrais chimique. Le digestat est issu de la co-digestion de la bouse de vache, de l'urine humaine et d'effluent de manioc. Il a été prélevé sur le site du projet VECDA et par la suite a été soumis à une dilution en tenant compte des paramètres stationnaires obtenus à l'issue de l'optimisation de la dose de digestat. Par exemple, pour une dilution de 75 %, il faut utiliser trois (3) parts de digestat brut pour une part d'eau. De plus, pour la fertilisation avec le digestat, un pied de manioc appartenant à l'unité expérimentale appropriée a reçu une quantité de digestat correspondant au volume déterminé précédemment comme optimal pour l'épandage. Pour les engrais minéraux solubles dans l'eau utilisés, les dilutions ont été faites selon les prescriptions du fabricant, mentionnées sur les emballages :

- E (NPK 20-15-15) : 35 mL par pulvérisateur à dos de 15 L ou 1 L par hectare ;
- F (NPK 4-3-12) : 80 mL par pulvérisateur à dos de 15 L ou 25 pulvérisateurs/ha ;
- G (NPK 7-21-7) : 45 mL par pulvérisateur à dos de 15 L ou 1 L par hectare.

3.3.3. Préparation du matériel végétal

Les boutures ont été prélevées sur des tiges saines âgées d'au moins 12 mois. Après récolte, les boutures ont été conservées à l'ombre pendant deux (2) jours pour favoriser une légère perte de leur humidité avant d'être découpées. La figure 18 présente les boutures de manioc sélectionnées avant implantation. Lors de cette étape, les extrémités apicales et basales des tiges ont été écartées, conformément aux pratiques agronomiques visant à utiliser uniquement les segments intermédiaires, plus vigoureux et assurant une meilleure reprise végétative. Ainsi, les boutures utilisées présentaient les caractéristiques suivantes : couleur grise, mesurant environ 20 cm de longueur, pesant en moyenne 50 grammes, et comportant au moins six (6) nœuds.



Figure 18 : Boutures de manioc de la variété Yacé pour la culture

3.3.4. Mise en culture et suivi

L'expérimentation s'est déroulée entre septembre 2022 et septembre 2023. L'itinéraire technique de culture est celui utilisé par les directions des programmes de recherche et de l'appui au développement et des systèmes d'information CNRA (N'zué *et al.*, 2005). Pour ce faire, les buttes ont été confectionnées selon les pratiques locales (Figure 19). La densité de plantation s'élevait à 10 000 plants par hectare (soit 1 m entre les lignes et 1 m entre les plants sur la même ligne). Par ailleurs, les boutures ont été insérées dans le sol au 2/3 de leur longueur totale. Après la mise en culture, le suivi a consisté à l'extirpation des mauvaises herbes présentes sur la parcelle. La Figure 20 montre la culture après trois (3) mois. Au total, quatre (4) sarclages ont été effectués jusqu'à la récolte. De plus, trois (3) épandages ont été effectués :

- le premier a eu lieu trois mois après la plantation qui correspond à T0 ;
- le deuxième a été apporté quatre (4) mois après la plantation qui correspond à T1 ;
- le dernier a été effectué un (1) mois après le précédent correspondant à T2.

Un mois après le dernier épandage (T3), quelques paramètres agro-morphologiques ont été déterminés tout comme à T0, T1 et T2.



Figure 19 : Vue de l'essai après la mise en place des buttes



Figure 20 : Vue de l'essai après 3 mois

3.3.5. Détermination de quelques paramètres agronomiques

Les paramètres déterminés ont concerné les paramètres de croissance et les paramètres de production. Ceux de croissance ou agro-morphologique ont été déterminés au temps T0, T1, T2 et T3. Quant aux paramètres de production, ils ont été mesurés sur les racines âgées de 12 mois.

3.3.5.1. Paramètres agro-morphologiques

Les principaux paramètres mesurés ont été le diamètre au collet, la hauteur des plantes et le nombre de feuilles. Le diamètre au collet des tiges a été déterminé à l'aide d'un pied à coulisse numérique, précisément à la base de la plante à un (1) cm au-dessus du niveau du sol. Il a été exprimé en millimètre. Concernant la hauteur des plantes, elle a été mesurée à l'aide d'un ruban mètre et d'un piquet gradué de trois mètres, en prenant comme référence le niveau du sol jusqu'à l'extrémité apicale. Elle a été exprimée en centimètre. Le nombre de feuilles a été dénombré chaque mois pendant une période de trois mois après l'apport de l'engrais. Ces paramètres ont été déterminés sur 20 plants par unité expérimentale soit 60 pieds pour un traitement.

3.3.5.2. Paramètres de production

Les paramètres de productions ont été déterminés sur les racines de manioc récoltées 12 mois après la plantation. Ces paramètres sont la longueur et le diamètre des racines, le nombre moyen de racines par plant et le rendement en racines de manioc. Pour la détermination de ces paramètres 20 plants ont été déterrés par traitement.

- Longueur et diamètre des racines

La longueur et le diamètre des racines ont été déterminés respectivement à l'aide d'un mètre ruban et d'un pied à coulisse. La longueur a été exprimée en centimètre pendant que le diamètre l'a été en millimètre. La mesure de la longueur a été faite de l'extrémité proximale à l'extrémité distale de la racine. Une fois la longueur prise, le milieu de celle-ci a été identifié et le diamètre est déterminé à cet endroit.

- Nombre de racines par plant

Le nombre de racines par plant a été déterminé par comptage selon un grade physiologique (diamètre >20 mm et longueur >10 cm), une fois les différents pieds déterrés.

- Rendement en racines par traitement

Le rendement a été déterminé sur chaque unité expérimentale selon la formule 10, décrite par Kouadio *et al.* (2023) :

$$\text{Rdt (t/ha)} = \text{DP} \times \text{MF} \quad (10)$$

Rdt : Rendement en racines fraîches (t/ha)

MF : Quantité moyenne de racines fraîches par plant exprimée en tonnes

DP : Densité de plantation (10 000 plants/ha)

3.3.6. Analyses physico-chimiques des racines de manioc récoltées

3.3.6.1. Détermination de l'humidité

Le taux d'humidité a été déterminé par gravimétrie après dessiccation à l'étuve selon la méthode de Favier (1977). Cinq (5) grammes de broyat de manioc (P_E) ont été introduits dans un creuset préalablement taré (P_0). Le creuset a été ensuite placé dans l'étuve (Memmert, Allemagne), réglée à 105 °C pendant 24 h. Après refroidissement dans un dessiccateur, les creusets ont été de nouveau pesés (P_f) à la balance électronique (OHAUS analytical plus). L'opération a été reprise jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La teneur en humidité a été calculée à partir de la formule 11 :

$$\% \text{ Humidité} = \frac{(P_f - P_0)}{P_E} \times 100 \quad (11)$$

Avec

P_E : Prise d'essai en gramme ;

P_0 : Poids à vide des creusets en gramme ;

P_f : Poids final (creuset + produit séché) en gramme.

3.3.6.2. Détermination de la teneur en cendres

Le taux de cendres brutes a été déterminé par gravimétrie après incinération au four selon la méthode de Favier (1977). Dans un creuset préalablement taré (P_1), 5 g d'échantillon ont été pesés (P_2). Le creuset contenant l'échantillon a été ensuite introduit dans le four Nabertherm. L'incinération a été effectuée à 550 °C pendant 5 heures. Après refroidissement au dessiccateur, le creuset a été à nouveau pesé à la balance électronique (P_3). Le taux de cendres exprimé en pourcentage est donné par la formule 12 :

$$\% \text{ Cendres} = \frac{(P_3 - P_1)}{(P_2 - P_1)} \times 100 \quad (12)$$

Avec

P_1 : Poids du creuset vide ;

P_2 : Poids du creuset vide + prise d'essai ;

P_3 : Poids du creuset vide + cendres.

3.3.6.3. Détermination du pH et de l'acidité titrable

Le pH et l'acidité ont été mesurés selon la méthode AOAC (2000). Une quantité de dix (10) g de manioc a été broyée dans 50 mL d'eau distillée. Le broyat obtenu a été centrifugé à 3000 tours/min pendant 30 min, et le surnageant a été recueilli dans un bocal. Le pH a été lu sur l'écran digital du multimètre étalonné (SALT METER) après avoir plongé directement l'électrode dans la solution.

Pour l'acidité titrable, le dosage a consisté à mesurer l'acidité du produit avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), ayant pour normalité 0,1 N, en présence d'un indicateur coloré comme la phénolphthaléine. Pour ce faire, un volume $V_1 = 10$ mL du surnageant précédemment obtenu additionné de trois (3) gouttes de phénolphthaléine a été titré en versant la solution de NaOH (0,1 N) jusqu'à l'apparition d'une coloration rose. L'acidité a été obtenue par la formule 13 :

$$\% \text{ Acide lactique} = \frac{V \times N \times PM}{PE} \quad (13)$$

Avec

V : Volume de NaOH versé pour avoir le virage (en mL)

N : Normalité de NaOH (0,1 N) ;

PM : Poids moléculaire de l'acide lactique (90 g/mol) ;

PE : Prise d'essai en gramme (10 g).

3.3.6.5. Détermination de la teneur en fibres brutes

Les fibres brutes ou fibres insolubles regroupent la cellulose, quelques hémicelluloses et la lignine. La teneur en fibres brutes des échantillons a été déterminée selon la méthode AOAC (1990). Cette méthode consiste à traiter l'échantillon à ébullition par l'acide sulfurique et ensuite par la soude. Le résidu obtenu est séché puis calciné et pesé. Une quantité de 2 g d'échantillon séché (Me) a été introduite dans un bécher contenant 50 mL d'acide sulfurique 0,25 N. Le mélange a été ensuite porté à ébullition pendant 30 min. Après cela, 50 mL de la soude 0,31 N ont été ajoutés au mélange en ébullition et le tout a été maintenu pendant 30 min. Après filtration, le résidu a été lavé plusieurs fois à l'eau distillée chaude jusqu'à l'élimination complète des alcalis. L'insoluble obtenu a été séché à 105 °C pendant 8 h et pesé (M_1). Ce résidu sec a été soumis à une incinération au four à moufle, préalablement chauffé à 550 °C pendant 3 h et les cendres ont été pesées (M_2). La teneur en fibres brutes a été donnée par la relation 14 :

$$\text{Fibres (\% MS)} = \frac{(M_1 - M_2)}{M_e} \times 100 \quad (14)$$

Avec

M_1 : Masse (g) du résidu séché.

M_2 : Masse (g) des cendres obtenues.

M_e : Masse (g) de l'échantillon

MS : Matière sèche

3.3.6.6. Dosage des sucres totaux

Le dosage des sucres totaux a été réalisé selon la méthode de Dubois *et al.* (1956) utilisant le phénol et l'acide sulfurique. En présence de ces deux réactifs, les oses donnent une couleur jaune-orange dont l'intensité est proportionnelle à la concentration des glucides. Pour ce faire, un (1) gramme de l'échantillon a été pesé et broyé. Au broyat obtenu, ont été ajoutés dix (10) mL d'éthanol à 80 %, puis deux (2) mL d'acide oxalique et deux (2) mL d'acétate de zinc. L'ensemble a été centrifugé à 3000 tr/min pendant 10 minutes. Le surnageant a été récupéré dans une fiole de 50 mL. Sur le culot, un volume de dix (10) mL d'éthanol à 80 % a été ajouté avant de centrifuger à nouveau pendant 10 minutes. Les surnageants récupérés ont été complétés à 50 mL avec de l'eau distillée. Un volume de 0,1 mL de l'extrait obtenu a été prélevé et additionné de 0,9 mL d'eau distillée, 1 mL de phénol à 5 % et 5 mL d'acide sulfurique concentré. Le tout a été laissé refroidir et la densité optique a été lue à 490 nm au spectrophotomètre, en utilisant un témoin contenant tous les produits sauf l'extrait éthanol-soluble. La densité optique a été convertie en quantité de sucres totaux grâce à la courbe d'étalonnage obtenue à partir d'une solution de glucose (1 g/L).

3.3.6.7. Détermination de la teneur en protéines brutes

La teneur en protéines brutes a été déterminée selon la méthode de Kjeldahl (AOAC, 1990). La détermination comprend une phase de minéralisation, suivie d'une phase de distillation et d'une phase de titrage par l'acide sulfurique en présence d'indicateur coloré. D'abord, une masse de 1 g d'échantillon a été pesée dans un matras de minéralisation à laquelle sont ajoutés une pincée du catalyseur (sélénium, sulfate de cuivre (CuSO_4) et de sulfate de potassium (K_2SO_4)) et 20 mL d'acide sulfurique concentré. La minéralisation a été effectuée à 400 °C pendant 2 heures dans un digesteur. Le minéralisât obtenu a été refroidi à la température ambiante, transvasé dans une fiole de 100 mL et complété avec l'eau distillée. Après avoir mis

le distillateur en marche, 10 mL du minéralisât ont été prélevés, auxquels ont été ajoutés 10 mL de NaOH (40 %). Le mélange a été placé dans le réservoir du distillateur. L'allonge du réfrigérant a été plongé dans un béccher contenant 20 mL d'acide borique (4 %) additionné d'indicateur mixte (rouge de méthyle + vert de bromocrésol) : la solution devient violette. La distillation a été effectuée pendant 10 minutes. A la fin de la distillation, la solution devient verte. La teneur en protéines brutes a été calculée par application de la formule 15 :

$$\% \text{ Protéines} = \frac{(V_e - V_b)}{1000 P_E} \times N \times 14,01 \times 6,25 \times 100 \quad (15)$$

Avec

P_E : Prise d'essai

V_b : Chute de la burette (blanc)

V_e : Chute de la burette (échantillon)

N : Normalité de l'acide sulfurique utilisé (0,1N)

14,01 : Masse molaire de l'azote

6,25 : Facteur de conversion

3.3.6.8. Détermination de la teneur en lipides

La teneur en matière grasse a été déterminée par la méthode d'extraction au Soxhlet, en utilisant l'hexane comme solvant. Les ballons ont été préalablement lavés et séchés et leur poids à vide (P_o) a été noté. Puis, 10 g d'échantillons (PE) ont été introduits dans les cartouches d'extraction qui ont été bouchées avec du coton et placées dans le Soxhlet. Chaque ballon a été rempli d'environ 300 mL d'hexane puis relié au dispositif de Soxhlet. L'extraction a duré 5 heures. A l'issue de l'extraction, l'hexane a été séparé des lipides par évaporation au rotavapor. Les ballons ont été ensuite séchés à l'étuve à 120 °C. Après deux heures à l'étuve, les ballons ont été refroidis au dessiccateur puis pesés (P_f). La teneur en matières grasses a été calculée selon la formule 16 :

$$\text{Teneur en lipides (\%)} = \frac{P_f - P_o}{PE} \times 100 \quad (16)$$

Avec

P_o : Masse du ballon à vide (g) ;

PE : Prise d'essai (g) ;

P_f : Masse du ballon contenant les lipides (g).

3.3.6.9. Détermination de la teneur en acide cyanhydrique (HCN)

Le dosage de l'acide cyanhydrique a été effectué selon la méthode alcaline de titration (FAO, 1956). Cette méthode est basée sur la complexation des ions argent par les ions cyanogènes en solution aqueuse. Une quantité de 27 g d'échantillon a été macérée dans 200 mL d'eau distillée pendant 18 h. Le macérât a été distillé par entraînement à la vapeur d'eau et a été recueilli dans 20 mL d'une solution de soude (5 %, m/v). Un volume de 100 mL de distillat recueilli a été dilué au 2/5. Après la dilution, 100 mL du distillat ont été prélevés et les ions cyanogènes ont été dosés par une solution titrante de nitrate d'argent (AgNO_3) à 0,02 N en présence de 8 mL d'iodure de potassium (KI) à 5 %. La fin du dosage est marquée par l'apparition d'une coloration opalescente. La teneur en acide cyanhydrique a été déterminée selon la formule 17 :

$$\text{HCN (mg/kg)} = 100 \times (V_e - V_{\text{témoin}}) \quad (17)$$

Avec

HCN : Teneur en acide cyanhydrique ;

$V_{\text{témoin}}$: Volume d' AgNO_3 (mL) versé pour le blanc ;

V_e : Volume d' AgNO_3 (mL) versé pour l'échantillon.

3.3.6.10. Détermination de la teneur en glucides totaux

La teneur en glucides totaux a été calculée selon la formule 18 décrite par Bertrand & Thomas (1910) :

$$\text{Glucides totaux (\%)} = 100 - (\% \text{ protéines} + \% \text{ lipides} + \% \text{ cendres}) \quad (18)$$

3.3.6.11. Détermination de la teneur en amidon

La teneur en amidon a été déterminée par calcul, selon la formule 19 décrite par Bertrand & Thomas (1910) :

$$\text{Teneur en Amidon (\%)} = 0,9 \times (\% \text{ Glucides totaux} - \% \text{ Sucres totaux}) \quad (19)$$

3.3.6.12. Détermination de la valeur énergétique

La valeur énergétique a été calculée selon la formule 20 utilisant les coefficients d'Atwater & Rosa (1899).

$$\text{Val. E (kcal/100 g)} = (4 \times \% \text{ Protéines}) + (4 \times \% \text{ Glucides totaux}) + (9 \times \% \text{ Lipides}) \quad (20)$$

Val. E : Valeur énergétique

3.3.6.13. Dosage des polyphénols totaux

La teneur en polyphénols totaux des échantillons a été déterminée selon la méthode de Folin-Ciocalteu, décrite par Wood *et al.* (2002) à partir d'extrait éthanolique. Un volume de 2,5 mL de réactif de Folin-Ciocalteu dilué au dixième a été ajouté à 30 μ L d'extrait éthanolique. Le mélange a été maintenu dans l'obscurité à température ambiante pendant 2 minutes, suivi de l'ajout de 2 mL de solution de carbonate de sodium (75 g/L). Par la suite, le mélange a été placé au bain-marie à 50 °C pendant 15 minutes, puis refroidi. L'absorbance a été mesurée à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, en utilisant de l'eau distillée comme blanc. Une courbe d'étalonnage a été établie avec de l'acide gallique à différentes concentrations. Les analyses ont été effectuées en triplicata, et la concentration en polyphénols a été exprimée en grammes par litre d'extrait équivalent acide gallique (g EAG/L), puis convertie en mg EAG/g. La teneur totale en polyphénols a été évaluée selon la formule (21) :

$$\text{Teneur en polyphénols (mg EAG/g)} = C \times fd \quad (21)$$

Avec

EAG : Equivalent acide gallique ; C : Concentration de l'extrait (mg EAG/g) ; fd : Facteur de dilution

3.3.6.14. Dosage des flavonoïdes

La méthode de Marinova *et al.* (2005) a été utilisée pour le dosage des flavonoïdes totaux. Dans une fiole de 25 mL, 2,5 mL d'extrait éthanolique et 0,75 mL de nitrite de sodium (NaNO_2) à 5 % (m/v) ont été introduits. Ensuite, 0,75 mL de chlorure d'aluminium (AlCl_3) à 10 % (m/v) a été incorporé au mélange. Celui-ci a été incubé à l'obscurité pendant 6 minutes. Après cette incubation, 5 mL de soude (NaOH , 1 N) ont été ajoutés, et le volume a été complété à 25 mL avec de l'eau distillée. La préparation a été agitée vigoureusement avant de procéder au dosage des flavonoïdes totaux à 510 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (UV-visible). La teneur totale en flavonoïdes exprimée en grammes équivalent quercétine par litre d'extrait (g EQ/L) a été convertie en mg EQ/g. Les essais ont été réalisés en triplicata sur les échantillons. La teneur totale en flavonoïdes a été évaluée selon la formule (22) :

$$\text{Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g)} = C \times fd \quad (22)$$

Avec

EQ : Equivalent quercétine ; C : Concentration de l'extrait (mg EQ/g) ; fd : Facteur de dilution

3.3.6.15. Dosage des tanins

La détermination des teneurs en tanins a été effectuée suivant la méthode décrite par Bainsridge *et al.* (1996). D'abord, 1 mL d'extrait éthanolique a été ajouté à 5 mL de réactif à la vanilline (0,1 mg/mL de vanilline dans l'acide sulfurique à 70 % (v/v)). Ensuite, le tout a été laissé reposer dans les tubes pendant 20 min à l'obscurité. Enfin, l'absorbance a été lue au spectrophotomètre à 500 nm contre le blanc. Ce blanc a été préparé pour chaque essai, en ajoutant 5 mL d'eau distillée dans les tubes à essai. La quantité de tanins dans l'échantillon a été déterminée à l'aide d'une gamme d'étalon établie à partir d'une solution d'acide tannique (2 mg/mL) dans les mêmes conditions que l'essai. La teneur en tanin a été déterminée selon la formule 23 :

$$\text{Avec } \boxed{\text{Tanin (mg EAT/g)} = \frac{\text{DO}_{500} \times 10^3}{3,11 \times \text{me}}} \quad (23)$$

$\text{DO}_{500} = 3,11 \times \text{masse (mg) Acide tannique ; me : Masse (g) de l'échantillon.}$

3.3.6.16. Dosage des éléments traces métalliques (ETM) et autres minéraux (P, K, Ca, Na et Mg)

Les teneurs en éléments minéraux des échantillons ont été dosées selon la méthode décrite précédemment dans la section Matériel et Méthodes au point 3.1.3.6.

3.3.7. Analyses statistiques

Pour le traitement statistique des données, le logiciel STATISTICA 7.1 a été utilisé. L'analyse de la variance à un facteur (ANOVA) a été réalisée pour comparer les moyennes de série de données tant au niveau des paramètres agronomiques que des paramètres physicochimiques du manioc. L'objectif visé a été de déceler des différences entre les traitements ; lesquelles seraient imputables à l'utilisation de fertilisants. Les différences ont été considérées significatives pour les valeurs de $p < 0,05$. Un test de comparaison multiple de Tukey HSD a été effectué pour comparer les traitements appliqués. Par ailleurs, des techniques exploratoires multivariées ont été appliquées sur les données. Des analyses en composantes principales ont été effectuées. Ces techniques ont eu pour objectifs de regrouper des traitements en tenant compte des similarités d'une part et de visualiser des différences d'autre part.

3.4. Détermination des effets du digestat d'effluents utilisé dans la culture du manioc sur la qualité de l'*attiéké*

3.4.1. Echantillonnage

Deux échantillons de racines de manioc dont l'un, issu de plants traités à l'aide du digestat et l'autre provenant de plants non traités ont été utilisés. Chaque échantillon d'environ 100 kg était constitué de racines âgées de 12 mois fraîchement récoltées. Les racines issues de chacun des échantillons ont été transformées en *attiéké*.

3.4.2. Production de l'*attiéké*

Pour la fabrication de l'*attiéké*, plusieurs étapes ou opérations unitaires ont été suivies. Ces opérations ont été identiques pour les échantillons de manioc collectés. Quelles que soient le type de racines (traitées ou non traitées), le procédé décrit par Sotomey *et al.* (2001) a été appliqué.

- Réception de la matière première

Après 12 mois de culture, les racines de manioc ont été déterrées (Figure 21), puis acheminées sur le site de production. Ces racines ont séjourné toute une nuit sur ce site. Avant le début de la transformation, les racines ont été triées en vue de se débarrasser de celles ayant subi une lignification ou même détériorées. Seules les racines apparemment saines ont été sélectionnées pour commencer la transformation.



Figure 21 : Echantillon de racines de manioc de la variété Yace récolté après 12 mois de plantation

- **Epluchage, lavage et broyage**

L'épluchage a été réalisé manuellement et a consisté à débarrasser les racines de leurs écorces à l'aide de couteaux en acier inoxydable. Ensuite, les racines épluchées ont été lavées dans de l'eau en les frottant à la main et réduites en cossettes de plus ou moins grande taille. Cette opération avait pour objectif d'éliminer les impuretés des pulpes (grains de sable, morceaux d'écorces, etc.). Elle a abouti à des cossettes propres et prêtes pour le broyage (Figure 22). Les pulpes de manioc lavées ont été broyées à l'aide d'un broyeur de manioc. Au cours de cette opération, les morceaux de manioc, les ferments (magnan) et de l'huile de palme blanchie ont été introduits dans le broyeur. La proportion de ferment ajouté à la pulpe a été de 8 % (m/m) pour chaque échantillon. Ces ferments ont été préparés à partir de racines de manioc de la variété Yacé, issues des racines traitées avec le digestat pour l'échantillon C, et des racines témoins pour l'échantillon témoin. Ils ont ensuite été introduits dans des sacs et laissés à température ambiante (28–30 °C) pendant 72 heures. Quant à l'huile de palme blanchie, un volume de 100 mL a été utilisé pour 50 kg de pulpe. A l'issue du broyage, la pâte de manioc obtenue a été introduite dans des sacs pour amorcer la fermentation (Figure 23).



Figure 22 : Manioc prêt pour broyage avec des sachets contenant des ferments



Figure 23 : Ensachage de la pâte de manioc

- **Fermentation**

La fermentation a consisté à laisser reposer la pâte de manioc broyé dans des sacs pendant 48 h à température ambiante (28-30 °C) (Figure 24). Ces sacs n'ont subi aucune pression durant la fermentation.



Figure 24 : Pâte de manioc emballée en cours de fermentation

- **Pressage**

Après 48 h de fermentation, la pâte a été pressée au moyen d'une presse à vis sans fin (Figure 25). Le pressage a permis d'éliminer une partie de l'eau et de l'amidon contenus dans la pâte.



Figure 25 : Pressage de la pâte de manioc

- **Emiettage et tamisage**

La pâte pressée en une masse compacte a subi un émiettage et un premier tamisage. Ces opérations ont permis de rendre friable la masse compacte et surtout d'éliminer des fibres et des fragments de pulpes mal broyées. A partir de mouvements de main circulaires exercés sur des mottes de pâte, les particules de manioc broyée et fermentée sont forcées à traverser les mailles du tamis (Figure 26).



Figure 26 : Emiettage de la pâte de manioc pressée

- **Grainage**

Le grainage a consisté à former des granules à la main dans une large cuvette (Figure 27). A cette fin, la pâte émiettée précédemment a été projetée à l'aide d'une main contre la paroi de la cuvette en position oblique. Cette position est tenue grâce à une autre main et un genou. Ainsi, les particules de la pâte roulent et descendent par gravité, ce qui leur donne une forme lisse et relativement sphérique. Ensuite, les granules ont été secoués dans un mouvement de rotation de la cuvette afin de les affermir. Lorsque des grosses boules sont formées, elles sont écrasées et recyclées contre la paroi.



Figure 27 : Formation des granules d'*attiéké*

- **Séchage**

Les granules obtenus ont été séchés sur des nappes en matière plastique. Durant environ 4 heures. Le séchage a été effectué à l'ombre sous un hangar. Au cours de cette opération, avec la main, la semoule a été de temps en temps remuée. Cette opération a permis l'évaporation de l'eau et du cyanure contenus dans la semoule. Elle a évité aussi son empatement lors de la cuisson.

- **Tamisage-calibrage**

Pour le tamisage-calibrage, un tamis à mailles d'environ trois (3) mm a été utilisé. Cette opération a permis d'éliminer les fibres et d'obtenir un calibrage homogène des granules de manioc (Figure 28).



Figure 28 : Tamisage- calibrage des granules d'attiéké

- **Vannage**

Le vannage a permis d'éliminer d'autres morceaux de fibres contenus dans les grains. L'opération a consisté à récupérer à l'aide d'un petit van une portion de la fraction granulaire, à le soulever jusqu'au niveau de la tête et à libérer son contenu par de légères secousses des bras (Figure 29). Les grains traversent, au cours de leur mouvement, un courant d'air et atterrissent dans un large récipient placé aux pieds pendant que la trajectoire des morceaux de fibres très légers est déviée. La fraction granulaire ainsi vannée est ensuite mélangée à la semoule obtenue après le deuxième tamisage.



Figure 29 : Opération de vannage de la semoule de manioc

- **Cuisson**

Pour la cuisson à la vapeur, un dispositif constitué d'une cuvette en aluminium perforée de trous, supportée par une marmite remplie d'eau a été utilisé. Cette marmite a été scellée à la passoire avec de la farine de manioc mouillée pour éviter les fuites de vapeur. Dès l'apparition des premières vapeurs, la semoule fraîche est versée dans la passoire. Durant la cuisson, la semoule a été retournée de temps en temps à l'aide d'une spatule pour permettre aux couches superficielles de cuire convenablement (Figure 30). La cuisson a duré entre 15 et 30 minutes, en fonction de l'intensité du feu et la quantité de semoule à cuire. A la fin de la cuisson, il est apparu une masse gélatineuse de couleur crème ou jaunâtre correspondant à l'*attiéké*.



Figure 30 : Cuisson de l'attiéké

3.4.3. Détermination des paramètres physicochimiques des échantillons d'*attiéké*

Les paramètres tels que la teneur en eau, pH, acidité titrable, teneurs en cendres, lipides, protéines brutes, glucides totaux, fibres brutes, sucres totaux, ainsi que la valeur énergétique ont été déterminés selon les protocoles décrits dans la section 3.3.6 des méthodes. Il en va de même pour le dosage des polyphénols totaux, des flavonoïdes et des tanins. Par ailleurs, les éléments minéraux, y compris les éléments traces métalliques (ETM), ont été analysés dans les échantillons d'*attiéké* en suivant la même procédure.

3.4.4. Analyse sensorielle des échantillons d'*attiéké*

Pour l'analyse sensorielle des échantillons d'*attiékés*, un test hédonique a été réalisé. Ce type d'évaluation renseigne sur l'acceptabilité, les préférences et les aversions des consommateurs d'un produit. En tenant compte du caractère plaisant ou déplaisant d'un produit tel que perçu par les organes de sens, les consommateurs notent sur une échelle lors du test hédonique leur appréciation affective. Dans la présente étude, l'évaluation sensorielle avait pour but d'apprécier l'acceptabilité de l'*attiéké* produit par les consommateurs et de savoir si des différences existent entre les produits évalués.

3.4.4.1. Choix de l'échelle et des appréciations hédoniques

L'évaluation hédonique des deux échantillons d'*attiéké* a nécessité une échelle de satisfaction en 9 points. Cette échelle va de « 1= extrêmement désagréable » à « 9= extrêmement agréable » (Tableau VIII). Elle a été choisie parce qu'elle est l'une des échelles les plus répandues et utilisées. De plus, elle donne une large gamme de ressentis correspondant aux sensations perçues par les consommateurs (Lawless & Heymann, 2010). En outre, l'échelle hédonique en 9 points est très simple à utiliser et facile à mettre en œuvre. Pour toutes les fois où une étude avait pour objectif de déterminer simplement s'il existe des différences entre les produits en termes d'acceptation par les consommateurs, l'échelle hédonique en 9 points est l'échelle de choix (Drake, 2009).

Pour apprécier l'acceptabilité de l'*attiéké* produit ainsi que les préférences des consommateurs, cinq (5) appréciations hédoniques ont été retenues. Il s'agit de l'appréciation globale, de l'appréciation visuelle, du goût, de l'odeur et de la texture. Ces descripteurs sont pertinents pour l'évaluation hédonique de l'*attiéké*, un des produits dérivés des racines de manioc les plus prisés par la population ivoirienne (Yéboué *et al.*, 2017). L'appréciation visuelle a concerné l'aspect visuel incluant la couleur et la forme des grains d'*attiéké*. Pour apprécier le goût, l'accent a été mis sur l'acidité ou l'aigreur et les saveurs et parfums en bouche décelables par mastication. La texture a été appréciée au toucher et en bouche en tenant compte de l'aspect collant, gélatineux ou non, la facilité des grains à se détacher et la fermeté entre autres. Concernant l'odeur, elle a été appréciée en tenant compte de l'âcreté ou non de l'*attiéké* dégusté. L'évaluation s'est conclue par l'attribution d'une note globale à chaque échantillon d'*attiéké* (Tableau IX).

Tableau VIII : Echelle hédonique à 9 points

NOTE	OBSERVATIONS
1	Extrêmement désagréable
2	Très désagréable
3	Désagréable
4	Plutôt désagréable
5	Ni désagréable, ni agréable
6	Plutôt agréable
7	Agréable
8	Très agréable
9	Extrêmement agréable

Tableau IX : Définition des appréciations hédoniques choisies pour l'analyse sensorielle

Descripteurs	Définition
Appréciation globale	Note globale de l' <i>attiéké</i> évalué
Aspect visuel	Appréciation de l'apparence, la couleur de l' <i>attiéké</i>
Goût	Evaluation du caractère acide, aigre et des saveurs lors de la mastication de l' <i>attiéké</i>
Odeur	Appréciation de l'âcreté et d'autres perceptions olfactives de l' <i>attiéké</i>
Texture	Appréciation de l'aspect collant au toucher, de la résistance à la mastication

3.4.4.2. Caractérisation des panélistes ou consommateurs

Des caractéristiques sociodémographiques ont été déterminées sur les panélistes en vue de caractériser l'échantillon de consommateurs interviewés. Cette caractérisation a consisté à recueillir des informations concernant le sexe, l'âge et la fréquence de consommation de l'*attiéké* par les panélistes. Un effectif de 60 personnes a été interrogé.

3.4.4.3. Conduite de l'évaluation hédonique

Deux types d'*attiéké* produits ont été soumis à un test hédonique. Il s'agit d'une part d'un échantillon d'*attiéké* fabriqué à partir de racines de manioc issues de plants traités avec le digestat et d'autre part d'un échantillon d'*attiéké* provenant des racines de manioc non traité et cultivées dans les mêmes conditions pédoclimatiques que les précédentes. Le test hédonique a été effectué suivant la procédure décrite par Lawless & Heymann (2013). Ce test a nécessité 60 panélistes et une fiche de dégustation (Annexe 2). Avant l'évaluation, une préparation minutieuse a été faite. Elle a consisté à générer des nombres aléatoires de 3 chiffres pour le codage des échantillons à analyser, à attribuer un numéro à chaque panéliste et à déterminer un ordre de présentation des échantillons aux panélistes. Les différents échantillons d'*attiéké* ont été servis en égale portion dans des assiettes blanches soigneusement étiquetées selon les codes à trois chiffres générés. Une fois le dispositif apprêté, les panélistes ont été invités à entrer dans la salle de dégustation et à prendre place dans les box disposés à cet effet. Dans chaque box, ont été disposés une fiche de dégustation et de l'eau pour le rinçage de la bouche entre chaque dégustation. Un entretien bref a été réalisé sur l'échelle à utiliser et les attributs à noter lors de l'évaluation. A l'issue de cet entretien, les échantillons d'*attiéké* ont été présentés aux panélistes

pour une évaluation en mode monadique ou en comparatif. Une fois le test achevé, le dépouillement et le traitement des données ont été les ultimes étapes.

3.4.5. Traitements statistiques

Les données enregistrées lors de la caractérisation physicochimique et de l'évaluation sensorielle des *attiékés* dérivés des racines ont été traitées en vue de déterminer les effets de l'utilisation du digestat d'effluents sur ces entités. Les données ont été soumises à des tests de normalité en vue de choisir ou non des tests paramétriques pour la comparaison des moyennes des paramètres déterminés. Une fois ces conditions vérifiées, des Tests de Student ont été réalisées pour comparer les moyennes enregistrées. Le seuil de significativité a été fixé à 5 %. Pour le traitement statistique des données, le logiciel STATISTICA 7.1 a été utilisé.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE I : Valeur qualitative du digestat issu d'un digesteur continu des effluents de manioc

La méthanisation des effluents provenant de la production d'*attiéké* génère non seulement du biogaz, mais aussi du digestat qui peut être utilisé en agriculture. Le présent chapitre a pour objectif de déterminer les qualités fertilisantes, et microbiologiques et l'innocuité du digestat en vue de son utilisation dans la culture du manioc. A cet effet, des échantillons de digestats issus de trois productions ont été collectés et caractérisés selon des méthodes standards. Les données recueillies ont été soumises à des traitements statistiques.

1. RESULTATS

1.1. Composition physicochimique des digestats d'effluents de manioc

1.1.1. Composition physicochimique moyenne du digestat

Les digestats d'effluents ont enregistré des valeurs de pH légèrement basique comprises entre 8,25 et 8,66 avec un pH moyen de $8,42 \pm 0,18$. Leurs valeurs de DCO, DBO₅, COT et NTK ont été respectivement de $207,68 \pm 60,64$ mg O₂/L, $58,83 \pm 29,02$ mg O₂/L, $35,81 \pm 22,25$ mg/L et de 1,5 g/L. Le rapport C/N obtenu pour le digestat a été de $0,023 \pm 0,004$. Par ailleurs, l'analyse de coefficient de variation (CV) a relevé que certains paramètres tels que DBO₅, COT, NTK varient fortement avec des CV supérieurs à 45 %. La teneur en COT est le paramètre qui a varié le plus (CV= 62,13 %) (Tableau X).

Tableau X : Composition physicochimique moyenne du digestat d'effluents de manioc

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de variation (%)
pH	8,25	8,66	$8,42 \pm 0,18$	2,14
DCO (mg O ₂ /L)	114,44	228,87	$207,68 \pm 60,64$	29,20
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	26,50	84,50	$58,83 \pm 29,02$	49,33
COT (mg/L)	18,82	61,00	$35,81 \pm 22,25$	62,13
NTK (g/L)	0,82	2,26	$1,50 \pm 0,70$	46,67
C/N	0,018	0,029	$0,023 \pm 0,004$	17,39

pH : Potentiel d'hydrogène ; DCO : Demande chimique en oxygène ; DBO₅ : Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours ; NTK : Azote total Kjeldahl ; COT : Carbone organique total ; C/N : Rapport Carbone sur azote.

1.1.2. Variation de la composition physicochimique du digestat d'une production à l'autre

L'analyse statistique a montré que les valeurs du pH sont restées statistiquement identiques pour les trois échantillons de digestat (Tableau XI). Il en est de même pour les valeurs de DCO. Concernant les valeurs du pH, elles ont oscillé de $8,28 \pm 0,05$ pour la Production 1 (P1) à $8,62 \pm 0,47$ (Production 3 (P3)). Celles de DCO étaient comprises entre $165,30 \pm 58,26$ mg O₂/L (P3) et $228,87 \pm 38,14$ mg O₂/L (P1).

Quant aux valeurs de DBO₅, COT et NTK, les analyses statistiques ont révélé une différence significative entre les trois productions. Les valeurs de DBO₅ ont varié entre $27,33 \pm 0,76$ (P3) et $84,50 \pm 0,50$ mg O₂/L pour la production 2 (P2). Celles du COT ont oscillé de $18,84 \pm 0,02$ (P2) à $61 \pm 0,01$ mg/L (P1). Pour les valeurs de NTK, elles étaient comprises entre $0,80 \pm 0,01$ (P2) et $2,20 \pm 0,01$ g/L (P1).

Pour ces digestats, le rapport C/N était compris entre $0,019 \pm 0,001$ (P3) et $0,027 \pm 0,001$ (P1). Ces rapports sont tous inférieurs à 8 (Tableau XI).

Tableau XI : Composition physicochimique des digestats d'effluents de manioc issus de trois productions successives

Paramètres	Production 1 (P1)	Production 2 (P2)	Production 3 (P3)
pH	$8,28 \pm 0,05^a$	$8,37 \pm 0,30^a$	$8,62 \pm 0,47^a$
DCO (mg O ₂ /L)	$228,87 \pm 38,14^a$	$228,87 \pm 76,29^a$	$165,30 \pm 58,26^a$
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	$64,67 \pm 0,58^a$	$84,50 \pm 0,50^b$	$27,33 \pm 0,76^c$
COT (mg/L)	$61,00 \pm 0,01^a$	$18,84 \pm 0,02^b$	$27,58 \pm 0,01^c$
NTK (g/L)	$2,20 \pm 0,01^a$	$0,80 \pm 0,01^b$	$1,40 \pm 0,01^c$
C/N	$0,027 \pm 0,001^a$	$0,022 \pm 0,001^b$	$0,019 \pm 0,001^c$

Les valeurs avec les mêmes lettres alphabétiques sur la même ligne sont statistiquement identiques au seuil de 5 % (Test LSD de Fisher) ; pH : Potentiel d'hydrogène ; DCO : Demande chimique en oxygène ; DBO₅ : Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours ; COT : Carbone organique total ; NTK : Azote total Kjeldahl ; C/N : Rapport Carbone sur azote.

1.2. Composition en minéraux des digestats d'effluents de manioc

1.2.1. Teneurs en macroéléments et oligoéléments

Le tableau XII présente quelques teneurs moyennes en macro et oligoéléments du digestat produit. Le digestat analysé renferme des macroéléments tels que le potassium ($1,650 \pm 0,600$ g/L), le phosphore ($0,738 \pm 0,415$ g/L), le calcium ($0,437 \pm 0,103$ g/L), le magnésium ($0,383 \pm$

0,050 g/L) et le sodium ($0,024 \pm 0,011$ g/L). Le potassium a été l'élément le plus abondant dans le digestat. Le phosphore a enregistré le CV le plus élevé (CV=56,23 %). Sa teneur a oscillé entre 0,324 et 1,160 g/L. En outre, des oligoéléments y ont été dosés. Il s'agit du bore, du vanadium, du molybdène et du manganèse à des teneurs respectives de $0,099 \pm 0,004$ mg/L, $0,042 \pm 0,021$ mg/L, $0,004 \pm 0,000$ mg/L et $0,002 \pm 0,001$ mg/L (Tableau XII).

Tableau XII : Teneurs moyenne en macro et oligoéléments du digestat d'effluent de manioc

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de variation (%)
Macroéléments (g/L)	Phosphore	0,324	1,160	$0,738 \pm 0,415$	56,230
	Potassium	0,175	2,180	$1,650 \pm 0,600$	36,360
	Sodium	0,011	0,035	$0,024 \pm 0,011$	45,830
	Magnésium	0,327	0,430	$0,383 \pm 0,050$	13,050
	Calcium	0,321	0,522	$0,437 \pm 0,103$	24,120
Oligoéléments (mg/L)	Bore	0,095	0,105	$0,099 \pm 0,004$	4,040
	Vanadium	0,020	0,065	$0,042 \pm 0,021$	50,000
	Manganèse	0,001	0,005	$0,002 \pm 0,001$	50,000
	Molybdène	0,002	0,006	$0,004 \pm 0,000$	0000

1.2.2. Variation des teneurs en macroéléments et oligoéléments du digestat d'une production à l'autre

L'analyse statistique a montré une augmentation significative ($p < 0,05$) de la teneur en sodium du digestat, de la première à la troisième production (Tableau XIII). Les valeurs du sodium ont varié entre $0,011 \pm 0,001$ g/L (P1) et $0,034 \pm 0,001$ g/L (P3). Il en va de même pour les teneurs en potassium et calcium des digestats qui ont augmenté significativement. Celles du potassium ont oscillé entre $0,990 \pm 0,010$ (P1) et $2,160 \pm 0,010$ g/L (P3). Quant aux teneurs en calcium des échantillons de digestats, elles ont augmenté en passant de $0,322 \pm 0,002$ g/L (P1) à $0,523 \pm 0,001$ g/L (P3). Ces variations ont été révélées comme significatives ($p < 0,05$) par l'analyse statistique. Contrairement à ces paramètres, les concentrations en magnésium et en vanadium ont diminué dans les digestats entre la production 1 et la production 3. Leurs valeurs respectives sont passées de $0,428 \pm 0,001$ (P1) à $0,328 \pm 0,001$ g/L (P3) et de $0,064 \pm 0,001$ (P1) à $0,021 \pm 0,002$ mg/L (P3). Pour les teneurs en phosphore, elles ont chuté de $1,157 \pm 0,003$ (P1) à $0,326 \pm 0,002$ g/L (P3).

Concernant le bore, les concentrations dans les digestats ont été statistiquement identiques pour les deux premières productions mais ont été différente de celle enregistrée dans la troisième production. Leurs valeurs dans les trois productions étaient comprises entre $0,096 \pm 0,001$ et $0,104 \pm 0,001$ mg/L. Par ailleurs, les paramètres tels que la teneur en manganèse et la teneur en molybdène des digestats n'ont pas varié significativement d'une production à l'autre avec des valeurs moyennes respectives de $0,002 \pm$ mg/L et $0,004$ mg/L (Tableau XIII).

Tableau XIII : Composition en macroéléments et oligoéléments des digestats d'effluent de manioc issus de trois productions successives

Paramètres		Production 1 (P1)	Production 2 (P2)	Production 3 (P3)
Macroéléments (g/L)	Phosphore	$1,157 \pm 0,003^a$	$0,730 \pm 0,002^b$	$0,326 \pm 0,002^c$
	Potassium	$0,990 \pm 0,010^a$	$0,178 \pm 0,030^b$	$2,160 \pm 0,010^c$
	Sodium	$0,011 \pm 0,001^a$	$0,027 \pm 0,001^b$	$0,034 \pm 0,001^c$
	Magnésium	$0,428 \pm 0,001^a$	$0,394 \pm 0,003^b$	$0,328 \pm 0,001^c$
	Calcium	$0,322 \pm 0,002^a$	$0,466 \pm 0,002^b$	$0,523 \pm 0,001^c$
Oligoéléments (mg/L)	Bore	$0,096 \pm 0,001^a$	$0,098 \pm 0,001^a$	$0,104 \pm 0,001^b$
	Vanadium	$0,064 \pm 0,001^a$	$0,042 \pm 0,001^b$	$0,021 \pm 0,002^c$
	Manganèse	$0,004 \pm 0,001^a$	$0,002 \pm 0,001^a$	$0,001 \pm 0,001^a$
	Molybdène	$0,004 \pm 0,002^a$	$0,004 \pm 0,002^a$	$0,004 \pm 0,002^a$

Les valeurs avec les mêmes lettres alphabétiques sur la même ligne sont statistiquement identiques au seuil de 5 % (Test LSD de Fisher).

1.3. Composition en éléments traces métalliques des digestats d'effluents de manioc

Les concentrations en éléments traces métalliques sont présentées dans le Tableau XIV. L'analyse statistique a mis en évidence une différence significative entre les teneurs en fer des digestats produits. Celles-ci ont oscillé entre $7,814 \pm 0,004$ (Production 3) et $23,707 \pm 0,003$ mg/L (Production 1). A l'instar du fer, les teneurs en mercure, chrome, arsenic, cadmium, nickel, cuivre, zinc et en plomb ont varié significativement d'une production à l'autre. Les valeurs étaient comprises entre $0,014 \pm 0,001$ et $0,026 \pm 0,001$ mg/L pour le chrome, entre $0,002 \pm 0,001$ et $0,003 \pm 0,002$ mg/L pour le mercure, entre $0,011 \pm 0,001$ et $0,033 \pm 0,001$ mg/L pour l'arsenic, entre $0,005 \pm 0,001$ et $0,023 \pm 0,001$ mg/L pour le cadmium, entre $0,016 \pm 0,002$ et $0,043 \pm 0,004$ mg/L pour le nickel. Les teneurs en cuivre et zinc ont varié respectivement entre $0,337 \pm 0,002$ et $0,906 \pm 0,020$ mg/L et entre $0,853 \pm 0,003$ et $3,190 \pm 0,001$ mg/L. Au niveau

du plomb, les teneurs ont oscillé entre $0,010 \pm 0,001$ et $0,041 \pm 0,001$ mg/L. Par ailleurs, les teneurs de ces éléments traces métalliques sont conformes à la norme NF U 44-051 (2006).

Tableau XIV : Composition en éléments traces métalliques des digestats d'effluents de manioc issus de trois productions successives

Paramètres (mg/L)	Production 1 (P1)	Production 2 (P2)	Production 3 (P3)	Moyenne	NORME NF U44-051.
Fer	$23,707 \pm 0,003^a$	$16,103 \pm 0,002^b$	$7,814 \pm 0,004^c$	$15,875 \pm 7,945$	
Chrome	$0,026 \pm 0,001^a$	$0,021 \pm 0,001^b$	$0,014 \pm 0,001^c$	$0,020 \pm 0,006$	< 120 mg/kg
Mercure	$0,002 \pm 0,001^a$	$0,003 \pm 0,001^b$	$0,003 \pm 0,002^c$	$0,003 \pm 0,001$	< 2 mg/kg
Arsenic	$0,033 \pm 0,00^a$	$0,021 \pm 0,001^b$	$0,011 \pm 0,001^c$	$0,021 \pm 0,01$	< 18 mg/kg
Cadmium	$0,023 \pm 0,001^a$	$0,014 \pm 0,001^b$	$0,005 \pm 0,001^c$	$0,014 \pm 0,008$	< 3 mg/kg
Nickel	$0,024 \pm 0,001^a$	$0,016 \pm 0,002^b$	$0,043 \pm 0,004^c$	$0,028 \pm 0,014$	< 60 mg/kg
Cuivre	$0,906 \pm 0,020^a$	$0,337 \pm 0,002^b$	$0,465 \pm 0,002^c$	$0,569 \pm 0,298$	< 300 mg/kg
Zinc	$3,190 \pm 0,001^a$	$2,059 \pm 0,001^b$	$0,853 \pm 0,003^c$	$2,034 \pm 1,168$	< 600 mg/kg
Plomb	$0,041 \pm 0,001^a$	$0,010 \pm 0,001^b$	$0,020 \pm 0,001^c$	$0,024 \pm 0,015$	< 180 mg/kg

Les valeurs avec les mêmes lettres alphabétiques sur la même ligne sont statistiquement identiques au seuil de 5 % (Test LSD de Fisher).

1.4. Caractéristiques microbiologiques des digestats d'effluent de manioc

Les résultats concernant la qualité microbiologique du digestat sont résumés dans le tableau XV. Les échantillons de digestats renferment des concentrations élevées de certains germes. La recherche et le dénombrement des microorganismes effectués sur les échantillons de digestat ont indiqué une absence de *Salmonella* sp, d'*Escherichia* sp, de *Clostridium* sp et des Anaérobies Sulfito-Réducteurs. Les charges en Coliformes totaux dans les échantillons sont de $1,3.10^8$ UFC/mL, $1,4.10^8$ UFC/mL et de $1,5.10^8$ UFC/mL respectivement pour les digestats des productions 1, 2 et 3. En ce qui concerne les *Staphylococcus* sp, leurs concentrations dans les digestats des productions 1, 2 et 3 s'élevaient respectivement à $2,6.10^8$ UFC/mL, $2,5.10^8$ UFC/mL et de $2,4.10^8$ UFC/mL. Les *Bacillus* sp ont enregistré des charges de $1,4.10^8$ UFC/mL, $1,6.10^8$ UFC/mL et de $1,6.10^8$ UFC/mL respectivement pour les digestats des productions 1, 2 et 3.

Tableau XV : Charges microbiennes des digestats d'effluents de manioc

Germes	Charges en UFC/ mL				Règlement (UE) n ° 142/2011
	Production 1	Production 2	Production 3	Moyenne	
Coliformes totaux	1,3 x 10 ⁸	1,4 x 10 ⁸	1,5 x 10 ⁸	1,4 x 10 ⁸	
<i>Escherichia</i> sp	< 1	< 1	< 1	< 1	<5.10 ³ UFC/mL
<i>Salmonella</i> sp.	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence dans 25 g
<i>Staphylococcus</i> sp	2,6 x 10 ⁸	2,5 x 10 ⁸	2,4 x 10 ⁸	2,5 x 10 ⁸	
<i>Bacillus</i> sp	1,4 x 10 ⁸	1,6 x 10 ⁸	1,6 x 10 ⁸	1,53 x 10 ⁸	
<i>Clostridium</i> sp	< 1	< 1	< 1	< 1	
ASR	< 1	< 1	< 1	< 1	

ASR : Anaérobies Sulfito-Réducteurs ; UFC/mL : Unités Formant Colonies par millilitre.

1.5. Différenciation entre les digestats issus de trois productions successives

L'ensemble des paramètres physicochimiques, ETM et caractéristiques microbiologiques des digestats issus des trois productions a servi de base pour une analyse en composantes principales. L'analyse du cercle de corrélation obtenu entre les variables caractérisant les digestats a montré que les paramètres microbiologiques (*Bacillus* sp, coliformes, Staphylocoques), le pH, le COT, la DCO, les taux de plomb, de cuivre, de chrome, de mercure, d'arsenic, de cadmium, de phosphore, de potassium, de zinc et de fer ainsi que le rapport C/N contribuent significativement à la composante 1. Pour la composante 2, ce sont les variables DBO₅, taux de nickel et taux d'azote qui y contribuent significativement (Figure 31). Par ailleurs, les trois productions analysées ont été visualisées dans le plan (Figure 32). A l'analyse, cette représentation dans le plan F1-F2 prend en compte 100 % des différenciations entre les digestats issus des trois productions. Ces productions sont bien distinctes les unes des autres dans ce plan. La production 1 est caractérisée par les taux d'azote, de cuivre, de plomb, et de COT élevés. La production 2 se différencie par la DBO₅ élevée. Pour le digestat issu de la production 3, le taux de nickel, le pH et les charges de coliformes élevés le caractérisent.

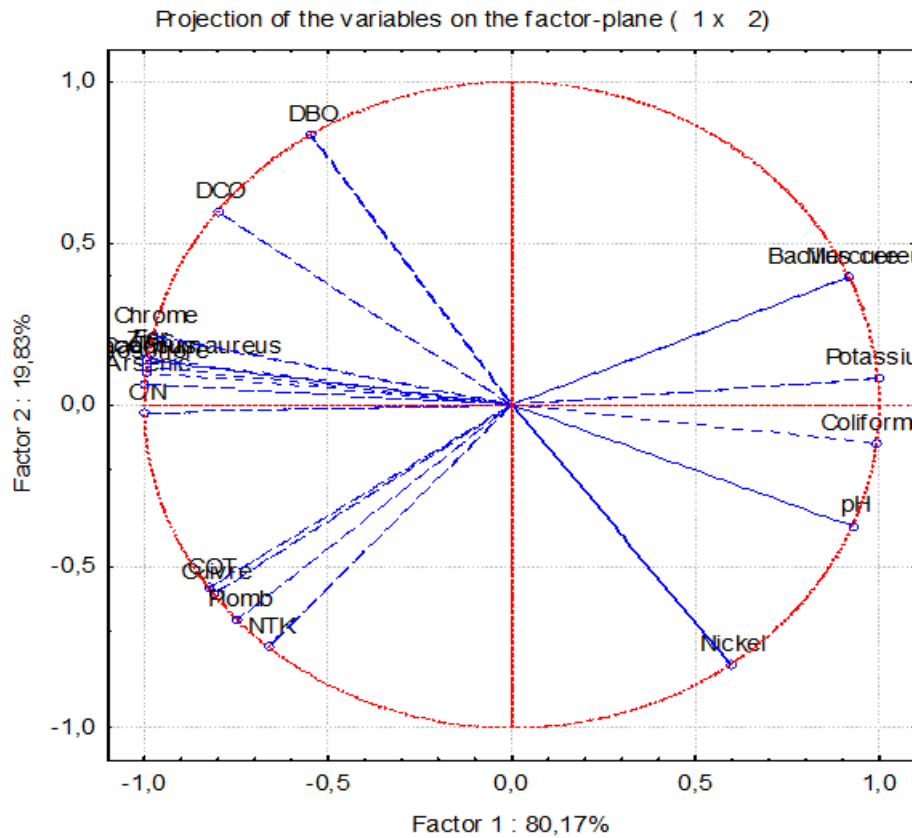


Figure 31 : Cercle de corrélation entre les variables caractérisant les digestats produits par ACP

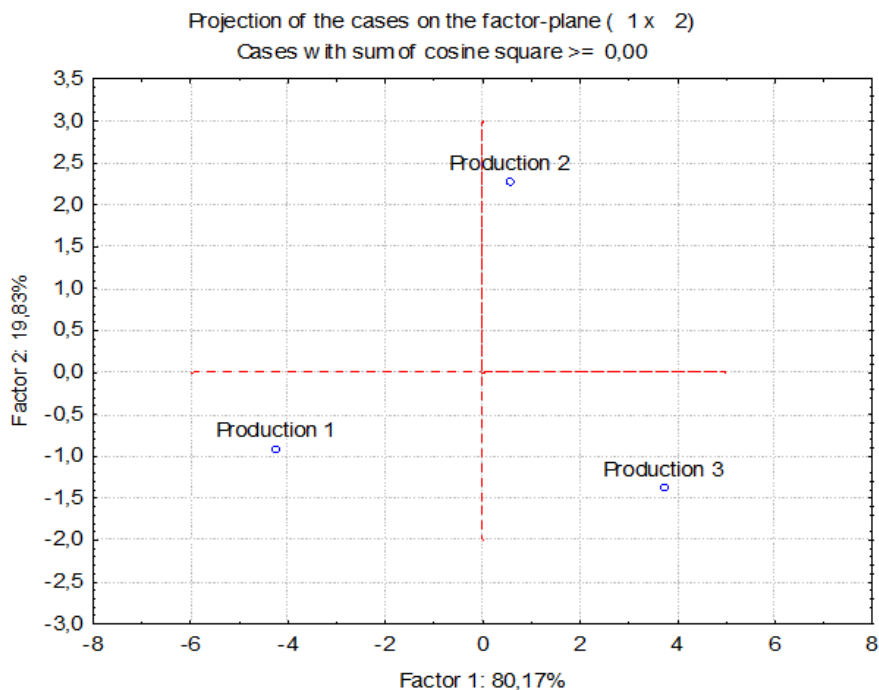


Figure 32 : Représentation des productions de digestat par ACP dans le plan F1 x F2

2. DISCUSSION

La détermination de la valeur agronomique d'un digestat constitue une étape cruciale pour sa valorisation en agriculture. Cela implique une caractérisation physico-chimique et une évaluation de son innocuité. À cet effet, plusieurs paramètres, tels que le pH, le COT, la DCO, la DBO₅, l'azote total, le potassium et le phosphore ont été mesurés dans des échantillons de digestats produits. De façon générale, le pH des digestats se situe entre 6,5 et 8,5 (ADEME, 2011 ; Tremier *et al.*, 2014 ; Tampio *et al.*, 2016). Dans la présente étude, les valeurs de pH enregistrées au niveau des digestats provenant des différentes productions sont comprises dans cet intervalle. Par ailleurs, un fertilisant ayant un pH proche de la neutralité est parfait pour diminuer l'alcalinité des sols, ce qui favoriserait l'assimilation du magnésium et du calcium par les plantes (Mosquera *et al.*, 2010).

De plus, une variation significative des teneurs en COT entre les productions a été révélée par l'analyse statistique. Les valeurs moyennes de ce paramètre sont largement inférieures à celles de la littérature (10 à 354 g C/L), rapportées par Reibel *et al.* (2018). Cette différence serait due à une importante perte de la quantité de carbone sous forme de biogaz au cours de la méthanisation (Tambone *et al.*, 2009 ; Reibel *et al.*, 2018). En effet, la méthanisation est un processus de dégradation de la matière organique. En addition, divers facteurs notamment le temps de séjour, la nature des intrants et la technologie employée, ont une influence sur le taux de dégradation de la matière organique (Carton & Bulcke, 2021). En outre, la DCO et la DBO₅ qui constituent des paramètres pertinents pour apprécier la biodégradabilité des digestats ont été déterminées. Les valeurs obtenues dans la présente étude sont largement inférieures à celles respectives de 7290 mg/L et 2916 mg/L rapportées par Kpata-Konan *et al.* (2019) qui travaillaient sur la production de digestat en utilisant un processus discontinu. Les valeurs observées seraient dues à une différence au niveau du procédé de méthanisation des effluents notamment le dispositif, le mode de fonctionnement et le temps de séjour du substrat dans les digesteurs. Aussi, ces différences peuvent s'expliquer par l'activité des microorganismes présents dans le digestat. Par ailleurs, la biodégradabilité des digestats a été évaluée. A ce propos, le rapport moyen DCO/DBO₅, globalement proche de 3 indique que les digestats produits sont biodégradables (IRE, 2007).

Outre ce caractère biodégradable, les digestats renferment des éléments fertilisants notamment de l'azote dont les valeurs sont situées dans l'intervalle allant de 1,10 à 240 g/kg, mentionné par ADEME (2011). Il est bien connu que les taux d'azote dans les digestats dépendent de la nature et du mélange des intrants utilisés. D'ailleurs, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les digestats issus des lisiers de porc et des sous-produits animaux

pendant que celles les plus faibles ont été observées au niveau des digestats provenant de la méthanisation des biodéchets (ADEME, 2011). Dans la présente étude, les digestats produits à partir d'effluents de manioc dont la teneur moyenne en azote est de l'ordre de 1,5 g/L, confirment bien cela. Selon la Directive Nitrate (91/676/CEE), ils peuvent être utilisés en agriculture et sont classés dans la catégorie des fertilisants de type II au regard de leur rapport C/N inférieur à 8. Pour ce type de fertilisant, l'azote libéré sera directement assimilable par les plantes.

En plus de l'azote, d'autres éléments sont essentiels pour les plantes. C'est notamment le cas du phosphore, qui joue un rôle crucial dans le développement des racines et participe à la division cellulaire (Garonne, 2021). Les teneurs en phosphore des digestats analysés sont en accord avec celles comprises entre 0,5 et 50 g/kg de phosphore enregistrées dans les digestats provenant de déjections animales et de biodéchets par SOLAGRO-IRSTEA (2015). A côté de l'azote et du phosphore, les digestats contiennent d'autres éléments fertilisants. Il s'agit notamment du potassium avec une valeur moyenne de 1,65 g/L. Celle-ci est en accord avec les valeurs indiquées par Möller & Müller (2012), qui ont révélé qu'un digestat ayant une concentration en potassium allant de 1,5 à 11,5 g/L serait idéal pour être utilisé comme engrais biologique.

Concernent le calcium, le magnésium et le sodium, les valeurs moyennes relevées sont inférieures à celle de l'ADEME (2011). Cette différence de concentration serait due au processus de méthanisation selon Pouech (2008). En effet, les teneurs en calcium et magnésium en solution sont réduites lors de la méthanisation du fait de la cristallisation de phosphates de calcium et de magnésium dans le digesteur (Pouech, 2008). C'est pourquoi ces éléments se trouveront majoritairement associés à la phase solide du digestat. Les variations de ces teneurs dans les digestats issus de trois productions successives pourraient s'expliquer par la variation des intrants utilisés au cours de la méthanisation. En effet, selon Reibel *et al.* (2018), la nature des intrants et les post-traitements sont les principaux facteurs influençant la composition des éléments fertilisants, les concentrations en éléments traces métalliques (ETM) et l'innocuité environnementale des digestats.

Par ailleurs, le digestat renferme des oligoéléments (bore, vanadium, manganèse et molybdène) en de faibles concentrations. Ceci n'est véritablement pas un problème, puisque les oligo-éléments sont utilisés en faible quantité par les plantes (Estevez, 2006). Ces éléments sont essentiels à un métabolisme normal afin d'assurer une bonne croissance (Tran *et al.*, 1995). A de faibles concentrations en effet, ils participent à différentes fonctions physiologiques des plantes (Parent & Rivest, 2003). Par ailleurs, les teneurs en matières fertilisantes N, P, K et en

oligo-éléments des digestats varient considérablement en fonction des intrants précise le guide élaboré par Carton & Bulcke (2021).

A côté de ces matières fertilisantes, l'innocuité des digestats a été évaluée entre autres par la détermination des teneurs en éléments traces métalliques (ETM). Le dosage de ces ETM dans les digestats qui seront par la suite épandus est indispensable puisqu'ils sont d'importants contaminants d'écosystèmes et de chaînes alimentaires (Franconi *et al.*, 2001 ; Yé *et al.*, 2020). Selon ces auteurs, les fortes concentrations d'ETM peuvent provoquer des phénomènes de phytotoxicité chez les plantes, contaminer les ressources en eau et nuire à la flore ainsi qu'à la faune du sol. Les problèmes associés aux ETM sont bien connus (Dan-Badjo *et al.*, 2014 ; Tremier *et al.*, 2014 ; Fares & Sédaira, 2021 ; Dossou *et al.*, 2022). Heureusement, dans cette étude, les teneurs moyennes déterminées dans les digestats, bien que variant d'une production à l'autre, respectent les normes NF U44-051(2002) établies par l'AFNOR concernant les ETM.

Outre les ETM, les caractéristiques microbiologiques des digestats ont été déterminées en vue d'apprécier leur innocuité. Pour les digestats, les charges moyennes des germes dénombrés doivent être inférieures aux limites fixées Règlement (UE) n° 142/2011. Ainsi, dans la présente étude, l'absence de germes pathogènes ou à potentialité pathogène (*Salmonelles*, *Escherichia sp*, *Clostridium sp* et ASR) au niveau des digestats produits est un gage d'innocuité. Par ailleurs, des coliformes totaux, des *Staphylocoques* et des *Bacillus y* ont été dénombrés. Il est bien admis que les charges en microorganismes des digestats sont dépendantes des matières méthanisées et des conditions de méthanisation (ADEME, 2011). De plus, Cuny (2015) a suggéré qu'une recontamination par des germes pourrait intervenir durant la manipulation et le stockage, expliquant de fait les charges de micro-organismes présents dans les digestats.

Par ailleurs, il a été constaté que certaines caractéristiques du digestat varient d'une production à l'autre ; ce qui peut être attribué à des variations au niveau de la composition des intrants utilisés lors de la méthanisation (ADEME, 2011). Cependant, ces variations ne s'écartent pas des limites recommandées. Ainsi, compte tenu de la présence d'éléments fertilisants, des teneurs en ETM conformes aux normes et des caractéristiques microbiologiques globalement satisfaisantes, l'épandage des digestats en tant qu'engrais biologique peut être envisagé dans les champs.

CONCLUSION PARTIELLE

En prélude à une utilisation des digestats dans les champs sous forme d'engrais biologique, leurs caractéristiques physicochimiques et microbiologiques ont été déterminées. L'étude a révélé que les digestats ont un pH voisin de la neutralité. Les valeurs de DCO et DBO ont donné un rapport montrant que le digestat produit est biodégradable. Par ailleurs, il renferme de la matière organique, du potassium, de l'azote et du phosphore. Les teneurs moyennes en éléments traces métalliques de ces digestats sont en accord avec la réglementation en vigueur. De plus, les digestats sont exempts de germes tels que *Escherichia* sp, *Salmonella* sp, *Clostridium* sp et ASR. En revanche, des *Staphylococcus* sp, *Bacillus* sp et des coliformes totaux y ont été dénombrés. En tenant compte des valeurs des paramètres mesurés et du rapport moyen C/N inférieur à 8, le digestat liquide résultant de la méthanisation des effluents de manioc est classé comme un fertilisant de type II et présente des potentialités pour un épandage dans les cultures. Pour une meilleure utilisation dans la culture du manioc, la dose optimale d'épandage devra être déterminée.

CHAPITRE II : Optimisation des paramètres d'épandage du digestat dans la culture du manioc par la méthodologie des surfaces de réponse.

Pour une utilisation efficiente du digestat dans la culture du manioc de variété Yacé, il était essentiel d'identifier les conditions optimales d'épandage. Cette partie du travail visait donc à déterminer les meilleures conditions permettant d'atteindre un rendement maximal en tubercules frais suite à l'utilisation de ce digestat. A cet effet, un plan composite centré à deux facteurs utilisant la méthodologie des surfaces de réponse a été mis en œuvre. Un nombre total de 13 essais de culture a été réalisé en faisant varier le taux de dilution du digestat (X_1) entre 25 et 100 % ainsi que le volume à appliquer (X_2) de 0,5 à 2 L. Après une période d'essai de 12 mois, le rendement en racines a été évalué. Les données collectées ont ensuite été soumises à des analyses statistiques.

1. RÉSULTATS

1.1. Variation du rendement en racines fraîches de manioc en fonction des doses de digestat d'effluents

Après les différentes séries d'épandage réalisées, le rendement enregistré pour les différents dosages de digestat était compris entre 26,62 et 56,50 t/ha (Tableau XVI). Le rendement moyen en racines fraîches a été de $41,02 \pm 4,93$ t/ha. Le rendement le plus faible a été obtenu avec un dosage de 35,5 % de digestat appliqué à raison de 0,72 L/plant de manioc. Concernant le rendement le plus élevé, il a été enregistré lorsque le digestat a été appliqué avec un dosage de 62,5 % et un volume de 1,25 L/plant de manioc.

Tableau XVI : Rendements en racines fraîches de la variété Yacé récoltée 12 mois après plantation en fonction des différents dosages de digestat d'effluent de manioc

Essais	Valeurs réelles des facteurs		Rendement (t/ha)
	X_1	X_2	
1	35,98	0,72	37,00
2	89,02	0,72	42,50
3	35,98	1,78	26,62
4	89,02	1,78	37,80
5	25,00	1,25	29,16
6	62,50	0,50	38,85
7	100,00	1,25	46,87
8	62,50	2,00	29,35
9	62,50	1,25	45,20
10	62,50	1,25	56,50
11	62,50	1,25	51,05
12	62,50	1,25	40,25
13	62,50	1,25	52,05

X_1 : Taux de dilution du digestat (%) ; X_2 : Volume du digestat (L) par plant de manioc.

1.2. Modélisation de l'épandage du digestat et qualité du modèle

L'effet du modèle a été révélé comme étant significatif ($p < 0,05$) par l'analyse de variance. Concernant la qualité du modèle, les résultats présentés dans le tableau XVII indiquent clairement que l'erreur d'ajustement du modèle n'est pas significative ($p > 0,05$). En outre, l'erreur expérimentale (160,76) se trouve être du même ordre de grandeur que l'erreur résiduelle (169,86). Par ailleurs, pour l'équation du modèle, les coefficients révélés significatifs ont été a_0 , a_1 , a_{11} et a_{22} avec les valeurs respectives de 49,01 ; 5,21 ; -5,51 et -7,47 (Tableau XVIII). De plus, l'effet principal du facteur « taux de dilution du digestat » a été significatif sur le rendement en racines. Il en a été de même pour les effets quadratiques des facteurs étudiés (taux de dilution et volume du digestat). Dès lors, le modèle postulé pour le rendement s'écrit :

$$Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2$$

Avec :

X_1 : Taux de dilution du digestat (%) ;

X_2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant de manioc.

La normalité des résidus du modèle a, par ailleurs, été étudiée. A l'analyse de la figure 33, les résidus sont très proches de la droite théorique montrant leur distribution selon une loi normale. De plus, leur représentation en fonction des valeurs prédites a montré que les points semblent répartis au hasard et qu'il n'apparaît pas de structures nettes (Figure 34). En addition, un coefficient de détermination R^2 de l'ordre de 0,83, supérieur à 0,80 et un taux de déviation (6,93 %) inférieur à 10 % ont été obtenus (Tableau XIX). Le modèle est par conséquent, satisfaisant.

Tableau XVII : Significativité de l'analyse de variance pour le modèle postulé

Source	Sommes des carrés	Degré de liberté	Carré moyen	F	P	Significativité
Modèle	861,71	5	172,34	7,10	0,01	Sig.
Erreur résiduelle	169,86	7	24,27			
Erreur d'ajustement	9,10	3	3,03	0,07	0,97	Ns
Erreur expérimentale	160,76	4	40,19			
Total	1031,57	12				

Sig. : Significatif ; Ns : Non significatif.

Tableau XVIII : Coefficients du modèle de surfaces de réponses et effets des facteurs sur le rendement en racines fraîches de manioc

Facteurs	Notation des coefficients	Coefficients de régression	Erreur type	P
Constante	a_0	49,01	2,20	0,00
X_1	a_1	5,21	1,74	0,02
X_2	a_2	-3,56	1,74	0,08
X_1X_2	a_{12}	1,42	2,46	0,58
X_1^2	a_{11}	-5,51	1,86	0,02
X_2^2	a_{22}	-7,47	1,86	0,00

X_1 : Taux de dilution du digestat (%) ; X_2 : Volume du digestat (L) par plant de manioc ; X_1X_2 : Effet d'interaction des facteurs taux de dilution et volume de digestat ; X_1^2 : Effet quadratique du facteur taux de dilution du digestat ; X_2^2 : Effet quadratique du facteur volume de digestat. Les coefficients sont significatifs à $p < 0,05$.

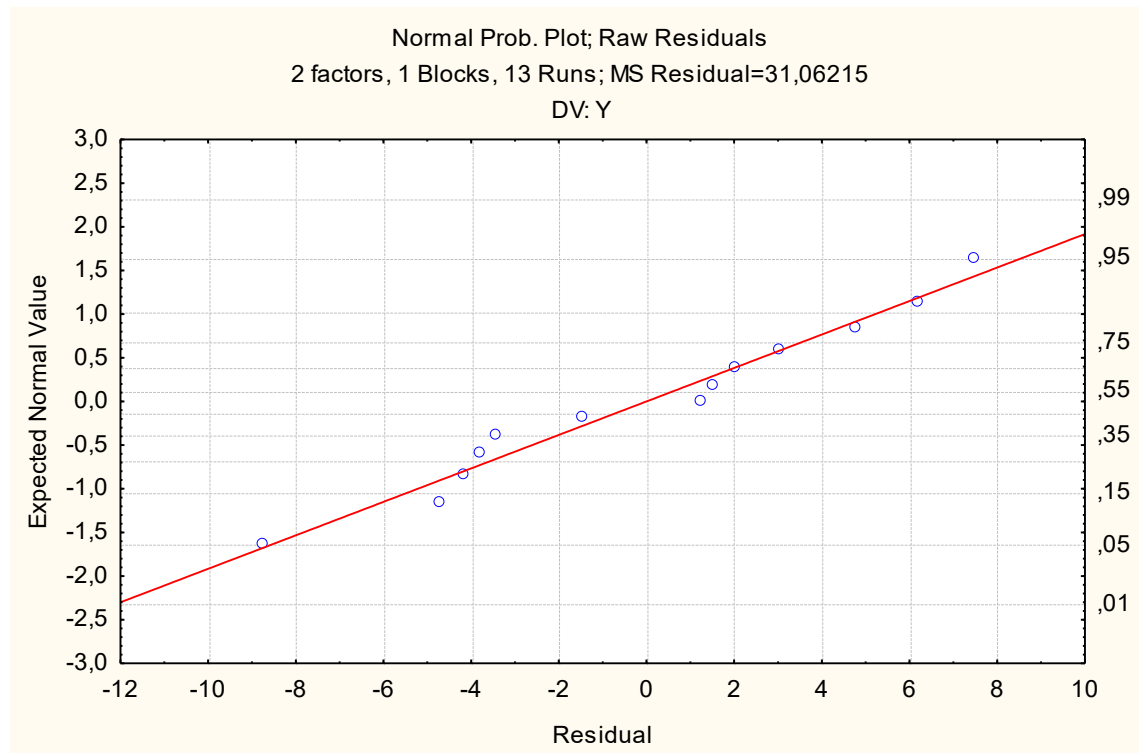


Figure 33 : Normalité des résidus du modèle

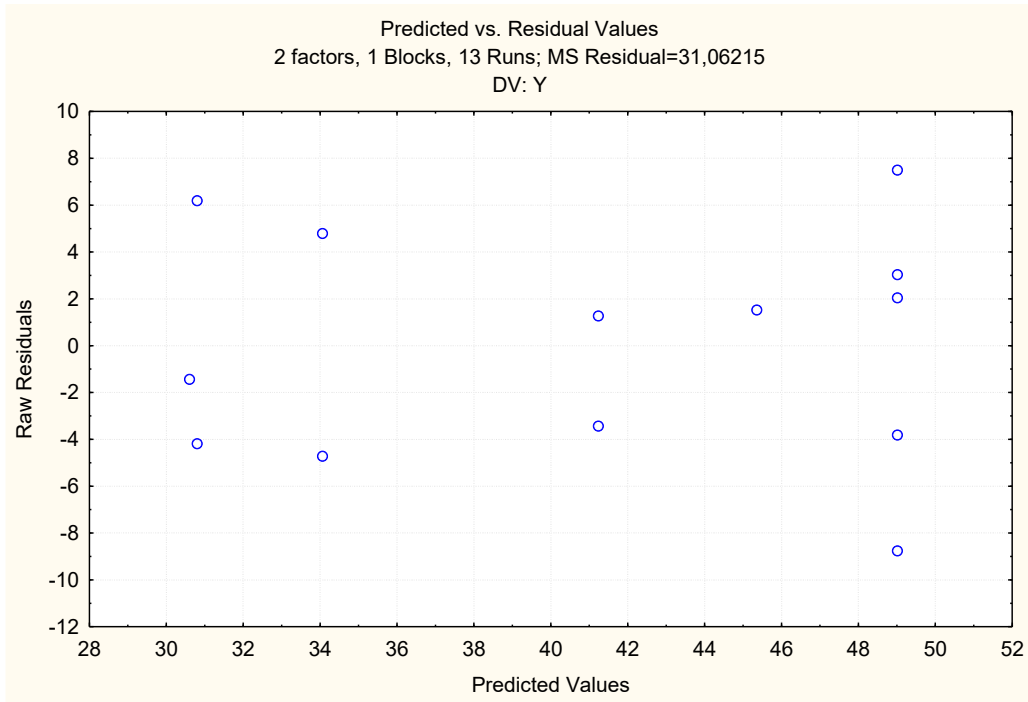


Figure 34 : Représentation des résidus en fonction des valeurs prédites par le modèle

Tableau XIX : Quelques critères statistiques de qualité du modèle

Paramètres	Valeurs
Coefficient de détermination R^2	0,83538
Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté)	0,7178
Pourcentage de déviation (%)	6,9284

1.3. Paramètres optimaux ou stationnaires d'épandage du digestat

Pour décrire le processus d'épandage étudié, un modèle de second degré a été utilisé. Les figures 35 et 36 présentent respectivement les courbes d'isoréponses pour le rendement en racines et les effets des facteurs (taux de dilution et volume de digestat à répandre) sur ce rendement. A l'analyse de ces figures, le rendement maximum qui peut être atteint est supérieur à 50 t/ha (50,24 t/ha). En outre, le rendement en racines est influencé par le taux de dilution et le volume du digestat à appliquer. Ce maximum théorique est obtenu en un point où la concentration (X_1) et le volume du digestat (X_2) valent respectivement 0,4727 et $3,38 \cdot 10^{-9}$ en valeurs codées. Les valeurs réelles correspondantes sont 75,03 % pour la concentration et 1,25 L pour le volume du digestat.

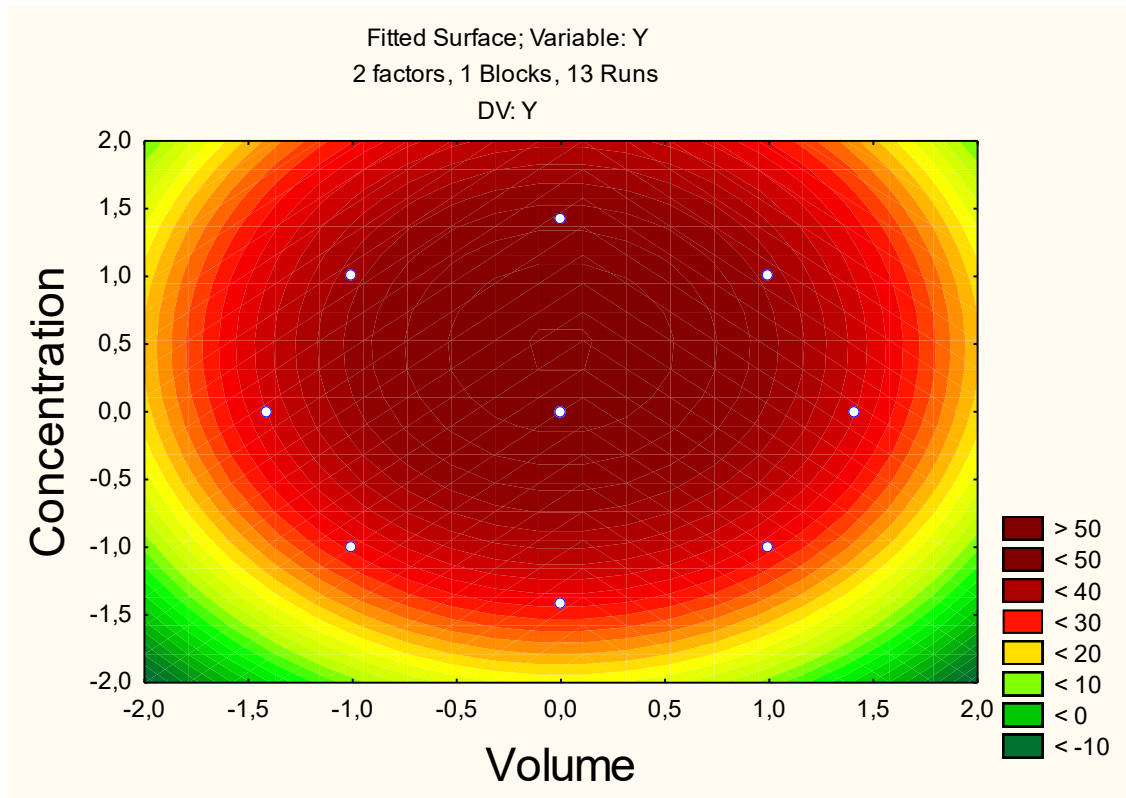


Figure 35 : Courbes d'isoresponses pour le rendement en racines fraîches de manioc en fonction du volume et de la concentration du digestat d'effluent utilisé

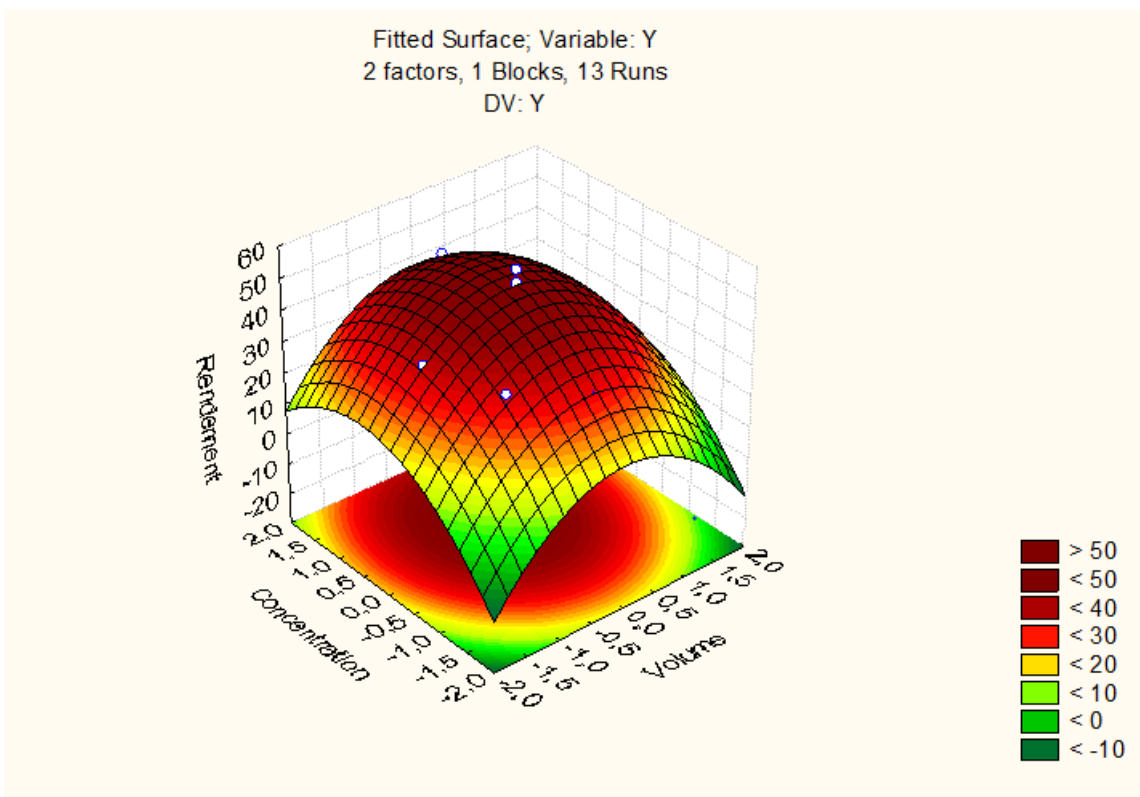


Figure 36 : Effet du volume et de la concentration du digestat d'effluent de manioc sur le rendement en racines de manioc

1.4. Validation du modèle par des tests de contrôle

Les conditions de réalisation des essais ainsi que les résultats des tests de contrôle en vue de la validation du modèle sont consignées dans le tableau XX. Le rendement moyen obtenu est de 47,06 t/ha. En outre, le pourcentage de déviation (7,14 %) est inférieur à 10 %. Ainsi, l'adéquation du modèle aux valeurs observées est satisfaisante.

Tableau XX : Résultats des tests de contrôle sous les conditions optimales d'application du digestat d'effluent de manioc.

Essais	Valeurs réelles		Rendement prédit (t/ha)	Rendement Expérimental (t/ha)	Résidus en valeur absolue	% Déviation
	X1	X2				
14	75,03	1,25	50,24	47,80	2,44	
15	75,03	1,25	50,24	43,30	6,94	7,14
16	75,03	1,25	50,24	50,10	0,14	
Moyenne			50,24	47,06		

X1 : Taux de dilution du digestat (%) ; X2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant de manioc.

2. DISCUSSION

Pour une utilisation efficace du digestat sous forme de fertilisant dans la culture du manioc, les conditions optimales de son épandage doivent être déterminées. Ces conditions sont celles permettant d'obtenir les meilleurs rendements en racines fraîches. En effet, un sous-dosage de fertilisants affecte négativement le rendement des cultures. En addition, un surdosage pourrait être une source de pollution. Pour ces raisons, une optimisation des paramètres d'application du digestat a été envisagée. Dans la présente étude, des expérimentations au champ utilisant différents dosages de digestat produit ont permis d'enregistrer des rendements en racines fraîches compris entre 26,62 et 56,6 t/ha. Travaillant sur l'intensification de la culture du manioc en Côte d'Ivoire, Bakayoko *et al.* (2007) ont rapporté des valeurs plus élevées (63 t/ha). Ces différences en termes de rendement peuvent en partie être dues au fait que les fertilisants utilisés soient différents. En effet, contrairement à la présente étude, ces auteurs ont appliqué de la fumure de bovins et de volailles. En outre, ils ont récolté les racines 15 mois après plantation contrairement à la présente étude dans laquelle les racines étaient âgées de 12 mois. Des rendements plus élevés allant de 70 et 76 t/ha ont été enregistrés par Bakayoko *et al.* (2012) qui travaillaient sur des variétés améliorées de manioc.

Par ailleurs, la recherche de liens entre les paramètres d'épandage du digestat et le rendement en racines fraîches a nécessité l'utilisation de plans d'expériences. En effet, les plans d'expériences se présentent comme un système de boîte noire dans lequel l'influence d'un certain nombre de facteurs sur un phénomène donné, appelé réponse est recherché (Goupy, 2006 ; Pillet, 2011). Applicables à de nombreux domaines, ces plans sont particulièrement importants et utiles à partir du moment où l'on recherche la relation qui existe entre une réponse (y) et des variables (xi). Au niveau de l'épandage des engrais, les problèmes liés à un surdosage ou un sous-dosage sont bien documentés (Carlen *et al.*, 2017 ; Jacquin, 2023). Il importe donc d'identifier les meilleures conditions pour cette opération. A ce sujet, les coefficients significatifs du modèle postulé pour le plan composite centré ont été utilisés pour établir l'équation reliant les facteurs au rendement. Il a été obtenu l'équation qui suit :

$$Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2.$$

A travers cette équation, le rendement est donc lié aux facteurs étudiés, représentés par le taux de dilution (X_1) et le volume du digestat à répandre par plant de manioc (X_2). De plus, le modèle établi est bon, avec un coefficient de détermination R^2 supérieur à 0,80 (Adjoumani, 2021). Selon Goupy & Creighton (2006), le R^2 est un bon indicateur de la qualité du modèle lorsqu'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé.

C'est d'ailleurs le cas dans la présente étude. Par ailleurs, l'étude de la normalité des résidus du modèle et la représentation des résidus en fonction des valeurs prédites ont révélé d'une part que les points sont proches de la droite théorique et d'autre part qu'ils sont répartis au hasard de sorte qu'aucune structure particulière n'émerge. Dans ces conditions, il n'y a plus d'information à extraire des données (Goupy & Creighton, 2006). Ceci confirme bien l'adéquation entre les rendements déterminés expérimentalement et ceux prédits par le modèle. Cette bonne adéquation révèle que le modèle de surface de réponse présenté par l'équation de second degré obtenu, peut effectivement être utilisé pour mieux comprendre le processus étudié (Adjoumani, 2021). Par conséquent, les conditions optimales incluant le taux de dilution et le volume appropriés à répandre par plant lors de l'épandage du digestat, peuvent être recherchées par la méthodologie des surfaces de réponses. Il s'agit alors d'un processus d'optimisation. Celle-ci a pour objectif d'identifier les conditions permettant d'obtenir la meilleure réponse, soit le meilleur rendement en racines de manioc. A cet effet, le rendement maximal obtenu avec les graphes de surface de réponses et le solveur d'Excel est de 50,24 %. Pour atteindre ce rendement, les conditions sont un taux de dilution de 75,03 % et un volume de digestat de l'ordre de 1,25 L en valeurs réelles. Travaillant sur les bonnes pratiques pour la production de manioc en République Centrafricaine, Kosh-Komba *et al.* (2021) ont obtenu un rendement similaire (50 t/ha). Ces auteurs ont utilisé une combinaison de fertilisants minéraux et organiques. Par ailleurs, les tests de contrôle réalisés en vue de la validation du modèle ont donné un pourcentage de déviation de 7,14 %, entre les valeurs prédites et celles expérimentales. Inférieur à 10 %, ce taux de déviation montre que le modèle est bon (Djomdi *et al.*, 2020). Par conséquent, le modèle établi peut être utilisé pour prédire les rendements en racines fraîches de manioc connaissant les valeurs des facteurs ou variables indépendantes. Aussi, le digestat peut être épandu dans la culture du manioc sous forme d'engrais biologique. Pour son utilisation de manière efficiente, un taux de dilution de 75,03 % et un volume de 1,25 L doivent être appliqués par plant. Un taux de dilution de 75 % signifie une part d'eau pour 3 parts de digestat brut produit. Ce dosage optimal doit être appliqué trois fois au cours du cycle, à partir du 3^e mois, avec un intervalle d'un mois entre chaque application. Ces conditions permettent d'éviter à la fois le sous-dosage et le surdosage.

CONCLUSION PARTIELLE

Appliquée à l'épandage d'un digestat liquide dans la culture du manioc, la méthodologie des surfaces de réponses s'est révélée être très utile. Elle a permis d'établir un lien entre le rendement en racines et deux facteurs étudiés. Le rendement en racines fraîches de manioc est influencé par les facteurs tels que le taux de dilution et le volume du digestat épandu. Les meilleures conditions d'épandage du digestat provenant de la méthanisation d'effluents de manioc en vue de l'obtention du rendement maximal ont été un taux de dilution de 75 % et un volume de 1,25 L à appliquer par plant de manioc. Dans ces conditions, le rendement en racines fraîches de la variété Yacé est de 50,24 t/ha. En outre, le respect de ces conditions permettra d'éviter à la fois le sous-dosage et le surdosage. Pour ce digestat, l'utilisation efficiente nécessite donc l'observation des conditions optimales déterminées pour l'épandage. Toutefois, pour une meilleure valorisation, l'impact du digestat utilisé dans la culture du manioc sur la composition chimique des racines récoltées mérite d'être déterminé.

CHAPITRE III : Effets du digestat issu de méthanisation d'effluents sur les paramètres agronomiques et physico-chimiques du manioc

Les digestats sont considérés comme des déchets issus de la production de biogaz. Ils pourraient être utilisés dans la culture du manioc. Cette partie de l'étude a pour objectif de déterminer l'effet du digestat sur les paramètres agronomiques et physico-chimiques du manioc. Pour ce faire, une expérimentation a été conduite avec un dispositif en bloc aléatoire complet. Le facteur fertilisant étudié est constitué de digestat dosé à 75 %, trois (3) engrais minéraux (NPK 20-15-15 ; NPK 4-3-12 et NPK 7-21-7) et d'un témoin. Les engrais ont été appliqués trois mois après la mise en place de la culture et renouvelés chaque mois sur une période de deux (2) mois. Un mois après chaque application, des paramètres de croissance ont été mesurés. De plus, des paramètres de production et des caractéristiques physico-chimiques ont été déterminés après la récolte des racines, intervenue 12 mois après la plantation. Les données collectées ont été soumises à des traitements statistiques.

1. RESULTATS

1.1. Effets des traitements sur les paramètres agronomiques

1.1.1. Paramètres de croissance

Le nombre de feuilles, le diamètre des tiges au collet et la hauteur des plants ont été mesurés sur une période de trois mois à partir du premier épandage. L'analyse statistique a montré qu'il n'existe aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les traitements portant sur le nombre de feuilles aux différents temps étudiés (T0, T1, T2 et T3). Le digestat (Traitement C) a donné un nombre de feuille statistiquement identique à celui du témoin (H), n'ayant reçu de traitement fertilisant. Il en est de même pour les traitements E, F et G qui ont donné des nombres statistiquement identiques au témoin H. Par ailleurs, une augmentation significative ($p < 0,05$) du nombre de feuilles a été enregistrée entre T0 et T3 quel que soit le traitement appliqué. Les valeurs ont varié de $26,00 \pm 6$ pour le traitement G à $48,00 \pm 9$ pour le traitement C (Tableau XXI).

Tout comme pour le nombre de feuilles, l'analyse statistique a révélé qu'il n'existe pas de différence significative au niveau du diamètre au collet des plants de manioc quel que soit le traitement aux temps T1, T2 et T3. Toutefois, le temps a eu un effet significatif sur l'évolution du diamètre au collet. Les valeurs du diamètre ont varié de $11,91 \pm 2,36$ mm à $19,63 \pm 4,05$ mm en trois (3) mois (Figure 37).

Tableau XXI : Evolution du nombre de feuilles de manioc dans le temps en fonction des traitements

Nombre de feuilles à différent temps				
Traitements	T0	T1	T2	T3
C	28,00 ± 6,00 ^a	23,00 ± 7,00 ^a	26,00 ± 10,00 ^a	48,00 ± 9,00 ^a
E	27,00 ± 7,00 ^a	27,00 ± 10,00 ^a	27,00 ± 9,00 ^a	46,00 ± 10,00 ^a
F	31,00 ± 6,00 ^a	25,00 ± 8,00 ^a	27,00 ± 8,00 ^a	47,00 ± 10,00 ^a
G	26,00 ± 6,00 ^a	24,00 ± 10,00 ^a	25,00 ± 9,00 ^a	45,00 ± 12,00 ^a
H	30,00 ± 5,00 ^a	24,00 ± 7,00 ^a	24,00 ± 7,00 ^a	46,00 ± 8,00 ^a

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, test de Tukey HSD). C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; T0 : Trois mois après plantation de la culture ; T1 : Un mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T2 : Deux mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T3 : Trois mois après l'apport de la première dose d'engrais.

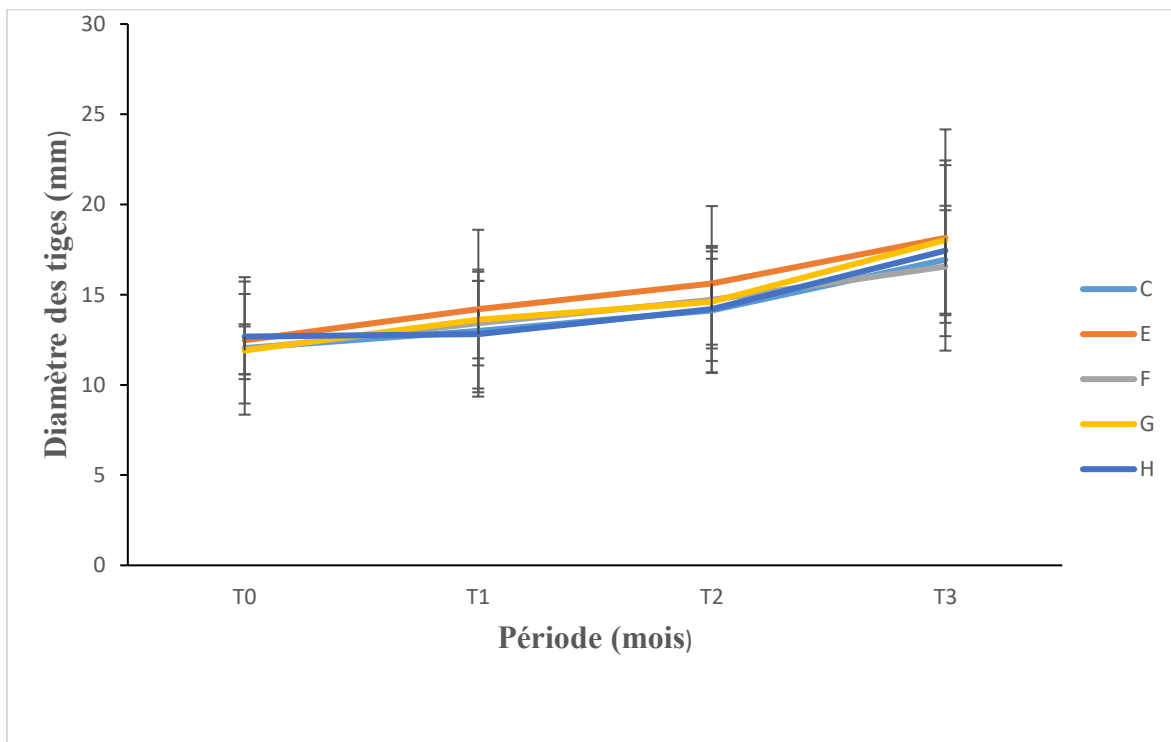


Figure 37 : Evolution du diamètre au collet de la tige de manioc en fonction des traitements

C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; T0 : Trois mois après plantation de la culture ; T1 : Un mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T2 : Deux mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T3 : Trois mois après l'apport de la première dose d'engrais.

Par ailleurs, l'évolution de la hauteur des plants pendant la durée de l'expérimentation est présentée sur la figure 38. La croissance en hauteur des plants de manioc est continue quel que soit le traitement. Les valeurs ont varié entre 68 (Traitement F) et 154,52 cm (Traitement G). En outre, une croissance significative en hauteur a été observée deux mois après l'apport des fertilisants.

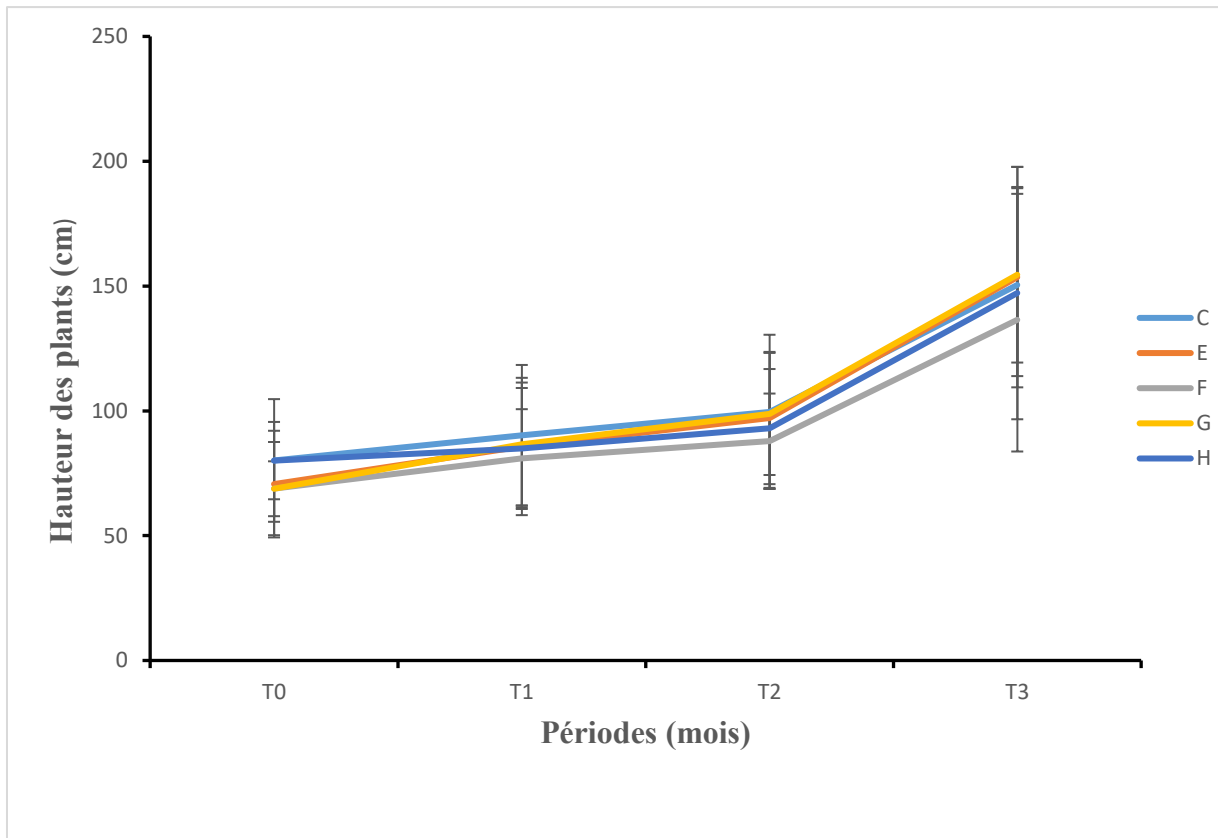


Figure 38 : Evolution de la hauteur des plants de manioc pendant la durée de l'expérimentation

C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; T0 : Trois mois après plantation de la culture ; T1 : Un mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T2 : Deux mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T3 : Trois mois après l'apport de la première dose d'engrais.

Les accroissements en hauteur des plants de manioc d'une période à l'autre ont été également analysés. L'analyse statistique a montré une augmentation significative ($p < 0,05$) des hauteurs de plants ayant reçu le traitement G par rapport aux autres traitements, les deux premiers mois après leur apport. Finalement, trois mois après, aucune variation significative de la hauteur n'a été observée entre les traitements. Les accroissements en hauteur des plants ont été statistiquement identiques pour tous les traitements trois mois après le premier épandage (Tableau XXII).

Tableau XXII : Accroissements en hauteur des plants de manioc dans le temps et en fonction des traitements

Traitements	Variation de la hauteur (cm) des plants à différent temps		
	T1-T0	T2-T0	T3-T0
C	14,74 ± 12,62 ^a	24,27 ± 13,62 ^a	76,46 ± 40,79 ^a
E	16,36 ± 12,21 ^a	27,44 ± 14,80 ^a	82,90 ± 39,89 ^a
F	13,63 ± 7,45 ^a	21,00 ± 7,83 ^a	69,18 ± 38,68 ^a
G	20,78 ± 18,22 ^b	30,96 ± 20,07 ^b	85,33 ± 42,23 ^a
H	10,44 ± 8,21 ^a	20,66 ± 13,06 ^a	71,62 ± 47,44 ^a

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, test de Tukey HSD). C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; T0 : Trois mois après plantation de la culture ; T1 : Un mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T2 : Deux mois après l'apport de la première dose d'engrais ; T3 : Trois mois après l'apport de la première dose d'engrais.

1.1.2. Paramètres de production

Les paramètres de production tels que le rendement en racines de manioc, le nombre de racine par plant, la longueur et le diamètre des racines ont été mesurés 12 mois après plantation. Les résultats obtenus en fonction des traitements sont consignés dans le Tableau XXIII.

Les rendements en racines ont varié entre $22,00 \pm 6,93$ t/ha (Traitement témoin H) et $48,88 \pm 3,40$ t/ha (Digestat). Cette variation de rendements en racines a été révélée comme significative ($p < 0,05$) par l'analyse statistique. Le digestat (Traitement C) a enregistré la valeur la plus élevée qui est de $48,88 \pm 3,40$ t/ha pendant que le témoin (Traitement H) a obtenu la plus faible ($22,00 \pm 6,93$ t/ha).

Tout comme le rendement, le nombre de racines par plant a été significativement influencé par les traitements. L'analyse a révélé que les plants traités avec le digestat ont enregistré le nombre de racines par plant les plus élevés ($8,23 \pm 1,19$) en comparaison au témoin ($5,27 \pm 2,01$). Par ailleurs, les plantes soumises aux traitements E, F et G ont présenté des valeurs statistiques similaires. Globalement, le nombre de racines par plante a varié de $5,27 \pm 2,01$ (Traitement H) à $8,23 \pm 1,19$ (Digestat). En ce qui concerne le diamètre des racines, les valeurs enregistrées ont été statistiquement identique entre les traitements, oscillant entre $45,44 \pm 5,33$ mm (Traitement F) et $51,6 \pm 12,30$ mm (Traitement C). De même, les longueurs des racines ont été uniformes et n'ont montré aucune différence significative entre les traitements.

Tableau XXIII : Valeurs des paramètres de production des racines de manioc en fonction des traitements

Paramètres de production	Traitements				
	C	E	F	G	H
Rdt(t/ha)	48,88 ± 3,40 ^b	31,00 ± 2,64 ^a	28,00 ± 2,64 ^a	32,00 ± 2,00 ^a	22,00 ± 6,93 ^a
Nb.Ra/plt	8,23 ± 1,19 ^b	6,00 ± 1,00 ^{ab}	7,13 ± 1,20 ^{ab}	6,43 ± 0,66 ^{ab}	5,27 ± 2,01 ^a
Dia. R (mm)	51,60 ± 12,30 ^a	46,93 ± 8,12 ^a	45,44 ± 5,33 ^a	49,53 ± 3,36 ^a	45,77 ± 5,25 ^a
Lg.R(cm)	28,07 ± 3,5 ^a	28,13 ± 2,80 ^a	26,13 ± 2,99 ^a	24,79 ± 5,38 ^a	25,10 ± 2,60 ^a

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, test de Tukey HSD). C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; Rdt : Rendement ; Nbr.R/plt : Nombre de Racines par plant ; Dia. R : Diamètre des Racines ; Lg. R. : Longueur des Racines de manioc.

1.2. Effets des traitements sur les paramètres physico-chimiques des racines récoltées

Tous les paramètres physico-chimiques déterminés au niveau des racines de manioc ont été significativement ($p < 0,05$) influencés par les traitements (Tableau XXIV). Il s'agit du taux d'humidité, du taux de cendres, du pH, de l'acidité, des teneurs en fibres, en HCN, en protéines, en glucides totaux, en sucres totaux, en lipides, en amidon et de la valeur énergétique. Concernant les valeurs de l'humidité, elles sont élevées et ont varié significativement entre $52,20 \pm 0,37$ et $55,91 \pm 1,42$ %. En outre, l'analyse statistique a révélé que le traitement F a enregistré le taux le plus élevé ($55,91 \pm 1,42$ %). Ce taux diffère statistiquement de ceux obtenus avec les autres traitements (C, E, G et Témoin H). Le digestat (Traitement C) a donné un taux d'humidité ($52,26 \pm 0,37$ %) statistiquement identique à ceux des traitements E, G et du témoin.

Concernant les taux de cendres, ils ont été dans l'ensemble faibles dans toutes les racines analysées. Ils ont oscillé entre $0,60 \pm 0,12$ (Traitement F) et $1,00 \pm 0,09$ % (Traitement G). Les valeurs les plus élevées ont été obtenues avec le traitement G et le témoin. Le digestat, quant à lui, a donné un taux de cendres ($0,78 \pm 0,05$ %) proche de celui du témoin ($0,91 \pm 0,11$ %).

Pour les taux de fibres des racines, ils ont varié significativement entre $1,84 \pm 0,02$ et $3,35 \pm 0,05$ % avec la valeur la plus élevée obtenue au niveau du digestat. Le témoin a enregistré un taux ($2,82 \pm 0,02$ %) proche de celui du digestat ($3,35 \pm 0,05$ %) pendant que le traitement F a obtenu le taux le plus bas ($1,84 \pm 0,02$ %). Par ailleurs, les taux d'amidon et d'acide lactique ont oscillé respectivement entre $84,41 \pm 0,04$ et $86,05 \pm 0,05$ % et entre $0,51 \pm 0,05$ et $1,08 \pm$

0,18 %. Parmi les traitements effectués, le digestat et le témoin ont donné des teneurs statistiquement identiques en amidon ($84,41 \pm 0,04$ - $84,55 \pm 0,11$ %) et en acide lactique ($0,93 \pm 0,14$ - $1,08 \pm 0,18$ %). Les teneurs les plus élevées en amidon ont été enregistrées au niveau des traitements F ($85,99 \pm 0,12$ %) et G ($86,05 \pm 0,05$ %). En addition, les racines traitées avec le digestat ont enregistré les plus faibles teneurs en HCN ($152,5 \pm 1,35$ mg/kg), en lipides ($0,66 \pm 0,01$ %) et en énergie ($400,20 \pm 0,23$ kcal/100 g). Les valeurs les plus élevées en HCN ($441 \pm 0,15$ mg/kg) et en lipides ($1,63 \pm 0,15$ %) ont été notées respectivement dans les racines issues du traitement F et du traitement témoin. Aussi, les racines sont très énergétiques et riches en glucides. Les valeurs les plus élevées en glucides totaux ($97,83 \pm 0,07$ %) et sucres totaux ($4,03 \pm 0,03$ %) ont été obtenues avec le digestat pendant que le témoin a enregistré les valeurs les plus faibles au niveau de ces paramètres.

Par ailleurs, le pH des racines analysées est faiblement acide. Il a oscillé entre $6,83 \pm 0,03$ et $6,94 \pm 0,02$. Contrairement au témoin et aux autres traitements (E, F, G), le digestat a obtenu un pH relativement plus bas ($6,83 \pm 0,03$). Concernant la teneur en protéines des racines, de faibles valeurs variantes entre $0,73 \pm 0,03$ et $1,81 \pm 0,06$ % ont été enregistrées. La valeur la plus élevée a été obtenue chez les racines issues du traitement témoin pendant que celle la plus faible a été enregistrée dans les racines issues de plants traités avec le digestat.

Quel que soit le traitement effectué, les racines de manioc récoltées sont riches en glucides totaux et en énergie. Elles sont en outre pauvres en lipides, protéines et cendres.

Résultats et Discussion

Tableau XXIV : Composition physicochimique des racines de manioc après 12 mois de culture en fonction des traitements effectués

Paramètres physico-chimiques	Traitements				
	C	E	F	G	H
Humidité (%)	52,26 ± 0,56 ^a	53,41 ± 0,34 ^a	55,91 ± 1,42 ^b	52,36 ± 0,43 ^a	52,20 ± 0,37 ^a
Cendres *(%)	0,78 ± 0,05 ^{ab}	0,63 ± 0,06 ^a	0,60 ± 0,12 ^a	1,00 ± 0,09 ^b	0,91 ± 0,11 ^b
pH	6,83 ± 0,03 ^a	6,91 ± 0,01 ^b	6,81 ± 0,04 ^a	6,91 ± 0,01 ^b	6,94 ± 0,02 ^b
Acide lactique (%)	1,08 ± 0,18 ^b	0,87 ± 0,23 ^{ab}	0,99 ± 0,16 ^b	0,51 ± 0,05 ^a	0,93 ± 0,14 ^{ab}
Fibres *(g/100 g)	3,35 ± 0,05 ^c	2,45 ± 0,04 ^c	1,84 ± 0,02 ^a	1,96 ± 0,01 ^b	2,82 ± 0,02 ^d
Sucres totaux* (%)	4,03 ± 0,03 ^d	1,65 ± 0,05 ^a	1,82 ± 0,03 ^b	2,07 ± 0,08 ^c	1,70 ± 0,05 ^{ab}
Protéines *(%)	0,73 ± 0,03 ^b	1,75 ± 0,06 ^d	1,37 ± 0,06 ^c	0,35 ± 0,07 ^a	1,81 ± 0,06 ^d
Lipides* (%)	0,66 ± 0,01 ^a	0,92 ± 0,03 ^b	0,67 ± 0,02 ^a	0,97 ± 0,02 ^b	1,63 ± 0,15 ^c
HCN (mg/kg MF)	152,55 ± 1,35 ^a	441 ± 0,78 ^c	370,80 ± 0,78 ^d	275,40 ± 1,35 ^c	236,25 ± 1,35 ^b
Amidon *(%)	84,41 ± 0,04 ^a	85,54 ± 0,05 ^b	85,99 ± 0,12 ^c	86,05 ± 0,05 ^c	84,55 ± 0,11 ^a
Glucides totaux *(%)	97,83 ± 0,07 ^d	96,07 ± 0,07 ^b	97,36 ± 0,13 ^c	97,68 ± 0,14 ^{cd}	95,65 ± 0,19 ^a
Val. E.* (kcal/100 g)	400,20 ± 0,23 ^a	402,05 ± 0,30 ^b	400,93 ± 0,59 ^{ab}	400,83 ± 0,29 ^{ab}	404,54 ± 1,01 ^c

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, test de Tukey HSD).

C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3 -12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; Val. E. : Valeur énergétique ; HCN : Acide cyanhydrique ; (*) : Teneurs exprimées par rapport à la matière sèche ; MS : Matière sèche ; MF : Matière Fraiche.

1.3. Effets des traitements fertilisants sur les composés antioxydants des racines récoltées

Les racines analysées renferment des composés tels que les polyphénols, les flavonoïdes et les tanins (Tableau XXV). Ces composés ont été significativement influencés par les traitements effectués. De plus, les valeurs les plus élevées pour ces composés ont été enregistrées dans les racines issues de plants traités. Concernant la teneur en polyphénols totaux, les valeurs les plus élevées sont issues du traitement E et les plus faibles, du traitement H. Les teneurs ont varié entre $25,5 \pm 0,5$ (Traitement E) entre et $9,67 \pm 0,29$ mg EAG/g (Traitement H). Pour la teneur en flavonoïdes, c'est le traitement E qui a enregistré la valeur la plus élevée pendant que le traitement H a donné la plus faible. Les valeurs de ces composés ont oscillé de $1,83 \pm 0,29$ (Traitement H) à $13,67 \pm 0,29$ mg EQ/g (Traitement E). En ce qui concerne la teneur en tanins, c'est le traitement E qui a enregistré la valeur la plus faible et les plus élevées ont été observés au niveau des traitements F et H. Les teneurs sont comprises entre $4,44 \pm 0,01$ (Traitement E) et $6,31 \pm 0,03$ (mg EAT/g) (Traitement F). Comparé au témoin H, le digestat (Traitement C) a présenté les teneurs les plus élevées en polyphénols totaux et en flavonoïdes totaux.

Tableau XXV : Composition en antioxydants des racines de manioc récoltées à 12 mois en fonction des traitements effectués

Paramètres physico-chimiques	Traitements				
	C	E	F	G	H
Polyphénols totaux (mg EAG/g)	$13,17 \pm 0,29^b$	$25,50 \pm 0,50^d$	$19,33 \pm 0,29^c$	$13,00 \pm 0,50^b$	$9,67 \pm 0,29^a$
Flavonoïdes totaux (mg EQ/g)	$5,67 \pm 0,29^b$	$13,67 \pm 0,29^d$	$11,00 \pm 0,05^c$	$2,67 \pm 0,29^a$	$1,83 \pm 0,29^a$
Tanins (mg EAT/g)	$4,61 \pm 0,02^b$	$4,44 \pm 0,01^a$	$6,31 \pm 0,03^c$	$5,34 \pm 0,01^c$	$6,03 \pm 0,05^d$

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, test de Tukey HSD). C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F :

Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; EAG : Equivalent acide gallique ; EQ : Equivalent quercetine ; EAT : Equivalent acide tannique.

1.4. Effets des traitements sur la composition en macroéléments des racines récoltées

Les analyses statistiques ont montré un effet significatif du traitement fertilisant sur les teneurs en minéraux des racines de manioc récoltées, excepté la teneur en magnésium (Tableau XXVI). Les engrais chimiques ont obtenu des teneurs plus élevées en phosphore, potassium, calcium et en potassium comparativement à l'engrais biologique et au témoin. Le traitement F a enregistré la teneur en phosphore la plus élevée ($4,28 \pm 0,21$ mg/kg) pendant que E a obtenu la teneur la plus élevée en potassium ($9,88 \pm 0,06$ mg/kg). Pour le calcium, ce sont les traitements G et E qui ont donné les plus fortes teneurs avec respectivement $13,48 \pm 0,09$ et $13,33 \pm 0,08$ mg/kg. Au niveau du sodium, le traitement E avec $5,15 \pm 0,23$ mg/kg a enregistré la teneur la plus élevée. Il est suivi par le traitement au digestat ($3,71 \pm 0,35$ mg/kg). Le digestat (Traitement C) a permis d'avoir des racines ayant des teneurs en potassium, calcium et sodium plus élevées que celles des racines témoins (Traitement H).

Tableau XXVI : Composition en macroéléments des racines de manioc récoltées à 12 mois en fonction des traitements effectués

Paramètres (mg/kg MS)	Traitements				
	C	E	F	G	H
Phosphore	$3,58 \pm 0,22^a$	$3,38 \pm 0,10^a$	$4,28 \pm 0,21^b$	$3,16 \pm 0,17^a$	$3,54 \pm 0,07^a$
Potassium	$8,91 \pm 0,30^d$	$9,88 \pm 0,06^e$	$4,49 \pm 0,17^a$	$7,14 \pm 0,15^b$	$7,77 \pm 0,13^c$
Calcium	$12,73 \pm 0,18^c$	$13,33 \pm 0,08^{cd}$	$9,06 \pm 0,49^a$	$13,48 \pm 0,09^d$	$11,48 \pm 0,17^b$
Sodium	$3,71 \pm 0,35^c$	$5,15 \pm 0,23^d$	$2,56 \pm 0,35^b$	$1,11 \pm 0,36^a$	$2,23 \pm 0,41^b$
Magnésium	$10,30 \pm 0,28^a$	$10,18 \pm 0,11^a$	$10,29 \pm 0,30^a$	$10,23 \pm 0,20^a$	$10,18 \pm 0,11^a$

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, test de Tukey HSD) ; C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ; MS : Matière sèche.

1.5. Effets des traitements sur la composition en Eléments Traces Métalliques (ETM) des racines récoltées

La composition en Eléments Traces Métalliques des racines de manioc en fonction des traitements est présentée dans le Tableau XXVII.

La teneur en fer a varié entre $4,41 \pm 0,36$ et $5,03 \pm 0,15$. L'analyse statistique a révélé que cette variation n'est pas significative. Ces teneurs sont identiques pour tous les traitements. Concernant les teneurs en nickel, cuivre, zinc, plomb, chrome, arsenic, cadmium et mercure des racines, l'analyse statistique a montré une différence significative ($p < 0,05$) entre les différents traitements. Le témoin (Traitement H) a enregistré la valeur la plus élevée uniquement pour la teneur en cuivre ($11,40 \pm 0,07$ mg/kg). Quant aux teneurs en chrome et mercure, c'est le traitement G qui donné les valeurs les plus élevées avec respectivement $8,98 \pm 0,09$ et $10,18 \pm 0,09$ mg/kg. Par ailleurs, le digestat a donné les racines ayant enregistré les valeurs d'arsenic les plus élevées ($11,05 \pm 0,13$ mg/kg). Pour les teneurs en nickel, plomb et cadmium, c'est le traitement témoin qui a enregistré les valeurs les plus faibles pendant que les plus élevées sont attribuées respectivement aux traitements E ($7,27 \pm 0,55$ mg/kg), C et G ($6,75 \pm 0,07$ mg/kg) et F ($12,46 \pm 0,02$ mg/kg).

Résultats et Discussion

Tableau XXVII : Composition en Eléments Traces Métalliques (ETM) des racines de manioc récoltées à 12 mois en fonction des traitements

Paramètres (mg/kg MS)	Traitements					Références
	C	E	F	G	H	
Fer	4,77 ± 0,35 ^a	4,84 ± 0,04 ^a	5,03 ± 0,15 ^a	4,84 ± 0,04 ^a	4,41 ± 0,36 ^a	-
Nickel	6,35 ± 0,23 ^b	7,27 ± 0,55 ^c	4,54 ± 0,10 ^a	6,27 ± 0,20 ^b	4,83 ± 0,23 ^a	50 mg/kg (Kalonda <i>et al.</i> , 2015)
Cuivre	5,24 ± 0,13 ^b	3,62 ± 0,10 ^a	9,36 ± 0,10 ^d	7,86 ± 0,05 ^c	11,40 ± 0,07 ^c	100 mg/kg (Kalonda <i>et al.</i> , 2015)
Zinc	9,06 ± 0,05 ^b	11,63 ± 0,08 ^d	2,75 ± 0,09 ^a	13,46 ± 0,06 ^e	11,32 ± 0,19 ^c	100 mg/kg (Kalonda <i>et al.</i> , 2015)
Mercure	8,06 ± 0,05 ^d	2,10 ± 0,02 ^a	4,66 ± 0,27 ^c	10,18 ± 0,09 ^e	2,95 ± 0,09 ^b	-
Chrome	8,81 ± 0,08 ^d	8,27 ± 0,08 ^c	4,80 ± 0,15 ^a	8,98 ± 0,09 ^d	6,72 ± 0,15 ^b	-
Arsenic	11,05 ± 0,13 ^d	4,99 ± 0,04 ^b	8,50 ± 0,33 ^c	2,23 ± 0,27 ^a	4,41 ± 0,23 ^b	0,1 mg/kg (Kamilou <i>et al.</i> , 2014)
Cadmium	8,75 ± 0,24 ^b	10,47 ± 0,07 ^c	12,46 ± 0,02 ^d	10,47 ± 0,07 ^c	2,81 ± 0,09 ^a	0,2 mg/kg (FAO/OMS, 2015)
Plomb	6,75 ± 0,07 ^b	3,43 ± 0,08 ^a	3,43 ± 0,08 ^a	6,75 ± 0,07 ^b	3,43 ± 0,08 ^a	0,3 mg/kg (FAO/OMS, 2015)

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, test de Tukey HSD).

C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin ;

(-) : Valeur non déterminée ; MS : Matière sèche.

1.6. Visualisation des différences entre les racines de manioc traitées sur la base des paramètres physicochimiques

L'ensemble des paramètres physicochimiques et des macroéléments a servi de base pour une analyse en composantes principales. L'analyse du cercle de corrélation obtenu entre les variables caractérisant les échantillons de manioc a montré que les macroéléments (phosphore et magnésium), le taux d'humidité, le pH, le taux de lipides et la valeur énergétique contribuent significativement au facteur 1. Pour le facteur 2, ce sont les variables HCN, taux de protéines et sucres totaux qui y contribuent significativement (Figure 39). Par ailleurs, les cinq (5) traitements ont été représentés dans l'espace plan F1 x F2 (Figure 40). Cette représentation résume à plus de 64 % les différenciations entre les échantillons de racines de manioc analysés. Dans ce plan, les échantillons sont distincts les uns des autres. Les racines issues du traitement C se caractérisent par les taux de sucres totaux élevés. Les échantillons provenant des traitements E et H se caractérisent quant à eux par les taux de lipides, de protéines, de valeurs énergétiques, et de pH élevés. Aussi, les racines issues du traitement F sont les plus isolées dans le plan F1 x F2. Elles sont caractérisées par les taux d'humidité et de phosphore élevés. Quant au traitement G, il est caractérisé par des taux d'humidité et de phosphore faibles.

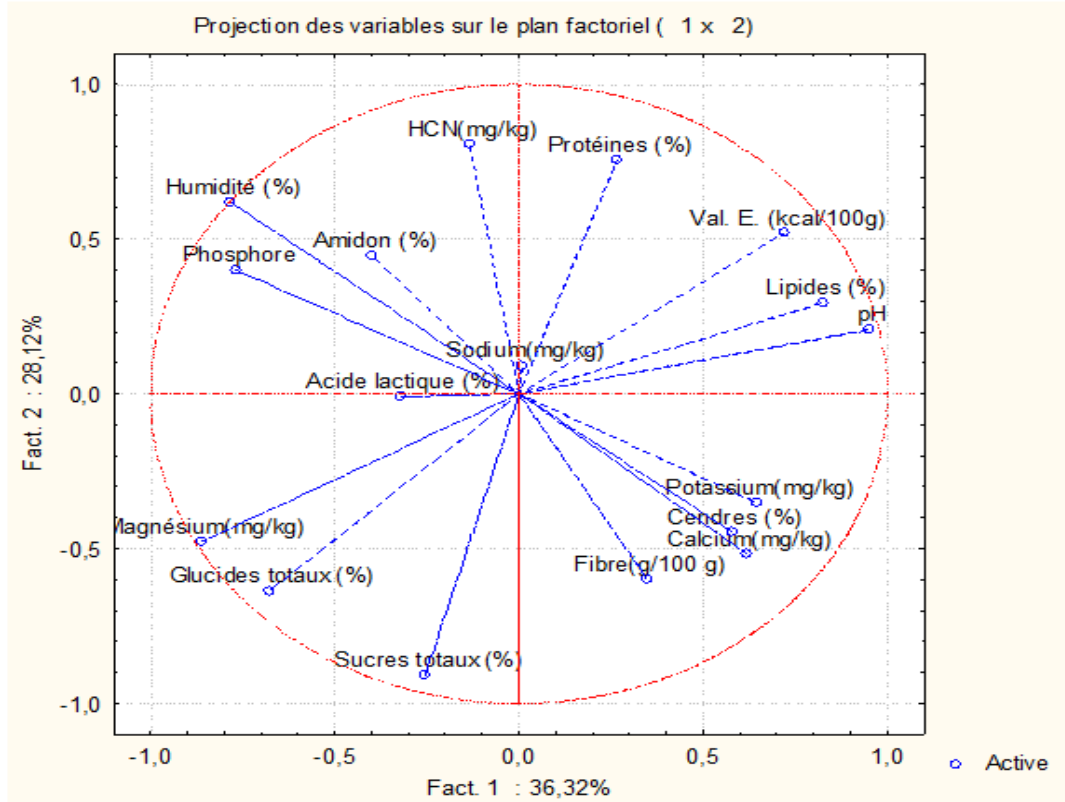


Figure 39 : Cercle de corrélation des variables caractérisant les échantillons de manioc issus de différents traitements par ACP

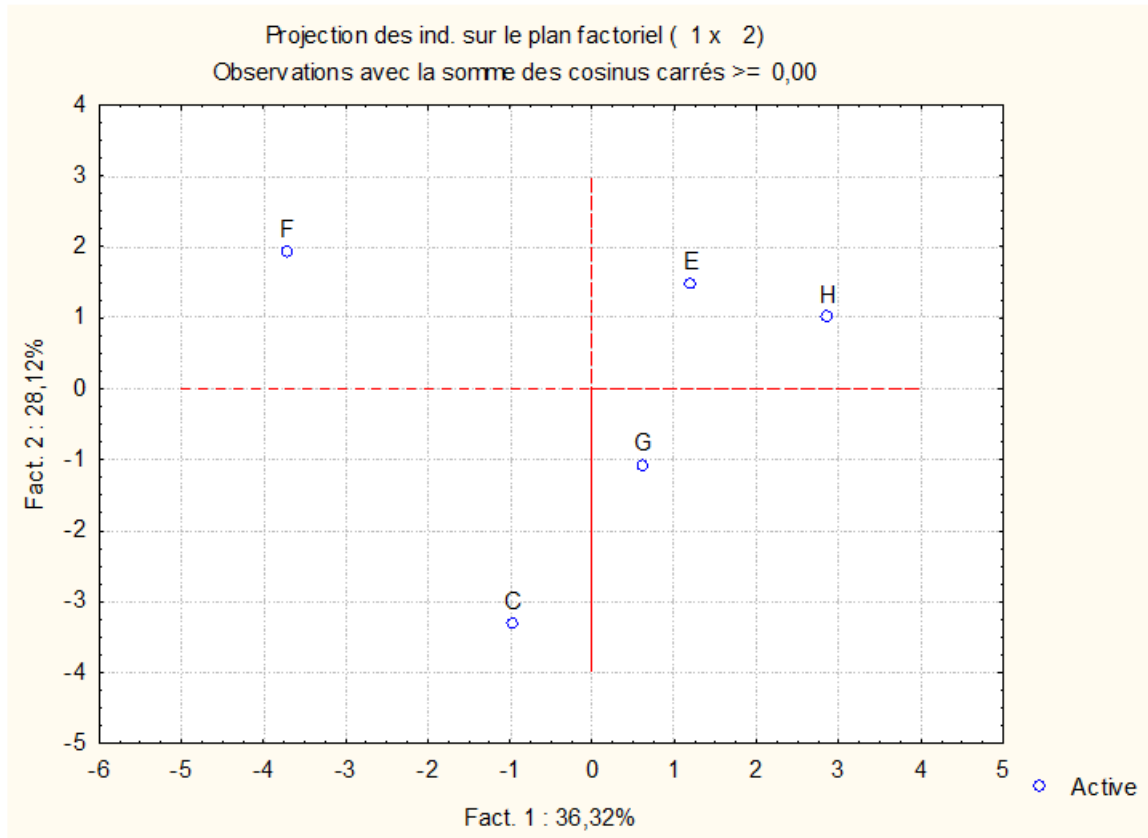


Figure 40 : Représentation des échantillons des racines de manioc issues des différents traitements dans le plan F1 x F2 par ACP
C : Digestat dosé à 75 % ; E : Engrais chimique NPK 20-15-15 ; F : Engrais chimique NPK 4-3-12 ; G : Engrais chimique NPK 7-21-7 ; H : Témoin.

2. DISCUSSION

Dans la présente étude, l'apport d'engrais n'a pas influencé significativement le nombre de feuilles des plants de manioc aux différentes périodes de mesure (T0, T1, T2 et T3). A chaque période, le nombre de feuilles est resté statistiquement identique pour tous les traitements. Au contraire, dans l'étude conduite par Zadi *et al.* (2018) sur la croissance des plants de cocotier en Côte d'Ivoire, les engrais à base de fiente de poulet ont eu des effets qui se traduisent par une augmentation du nombre de feuilles émises, de la circonférence au collet et de la hauteur des plants. Par ailleurs, une augmentation significative ($p < 0,05$) du nombre de feuilles a été notée entre T0 et T3 quel que soit le traitement appliqué. Ce développement foliaire est associé à la croissance des végétaux. Selon Schafer (1999), l'une des conditions indispensables à l'obtention de rendements élevés en racines est un développement foliaire rapide et élevé. Tout comme le nombre de feuilles, le diamètre au collet des tiges de manioc n'a pas été affecté par les traitements aux différents temps d'observation en comparaison au témoin. Toutefois, le temps a eu un effet significatif sur l'évolution du diamètre au collet. Les valeurs ont varié de $11,91 \pm 2,36$ à $19,63 \pm 4,05$ mm sur les quatre (4) mois d'analyse. L'augmentation du diamètre dans le temps (entre T0 et T3), notée dans cette étude quel que soit le traitement pourrait être due à la grande disponibilité d'éléments nutritifs. Zadi *et al.* (2018) ont enregistré plutôt des effets significatifs d'engrais sur la circonférence au collet. La variation de la hauteur des plants de manioc dans le temps et en fonction des traitements a été analysée. Le traitement G a entraîné l'augmentation significative de la hauteur des plants de manioc pendant les deux premiers mois après l'épandage. L'effet positif des engrais minéraux sur les plantes a déjà été rapporté par plusieurs auteurs (Ogbonna *et al.*, 2012 ; Ballot *et al.*, 2016 ; Ognalaga *et al.*, 2017 ; N'diaye *et al.*, 2019). Les variations significatives de la hauteur des plants sont le signe d'un développement végétatif plus important que le témoin. L'augmentation de la hauteur un à deux mois après l'apport des engrais peut s'expliquer par le fait qu'un apport suffisant d'engrais minéraux accélérerait la croissance des plants de manioc. Leurs effets sur la croissance en hauteur sont dus à la présence d'éléments nutritifs apportés. Cela est confirmé par Verma (2011), qui a montré que les engrais minéraux complets sont conçus pour combler les besoins en nutriments des plants pour ainsi accélérer la croissance. Cependant, les hauteurs des plants ont été statistiquement identiques pour tous les traitements trois mois après épandage.

Le meilleur rendement en racines de manioc (48,88 t/ha) est obtenu sur les plants ayant reçu le traitement C (digestat à 75 %). Ces résultats confirment ceux obtenus par Ballot *et al.* (2016) dont les travaux en Centrafrique ont montré un accroissement du rendement de manioc

de plus de 50 % du fait de la fertilisation. Ce rendement obtenu est le résultat de la grande disponibilité en éléments minéraux et de l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol du fait de l'apport d'engrais organique. Aussi, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sur la fertilisation organique et/ou inorganique du manioc dans d'autres régions d'Afrique subsaharienne, notamment ceux de Kolawole *et al.* (2014) sur la même culture au Nigéria. Ces auteurs ont montré que la tendance générale de l'évolution des propriétés de sol testées et du rendement était à la hausse par rapport au traitement témoin. Des résultats similaires obtenus par Kasongo *et al.* (2013) en République du Congo sur le soja et le maïs, Shokalu *et al.* (2010) sur *Celosia argentea* au Nigéria ont montré que les parcelles ayant reçu les biomasses de *Tithonia diversifolia* (avec ou sans engrais chimiques) ont donné des rendements plus élevés comparées au témoin. En outre, au sud du Sénégal, des travaux ont rapporté que les rendements en grains les plus élevés ont été obtenus avec les apports de fertilisant minéraux de niveau 2 (75 kg/ha NPK + 50 kg/ha Urée) et de niveau 4 (225 kg/ha NPK + 150 kg/ha Urée). Ces fertilisants ont entraîné des taux d'accroissements respectifs de 37,1 % et 62,3 % par rapport au témoin non fertilisé (N'diaye *et al.*, 2019). Dans la présente étude, seul le digestat à 75 % a enregistré le rendement le plus élevé (48,88 t/ha). Cette valeur est inférieure à celle rapportée par Bakayoko *et al.* (2007) qui est de 63 tonnes de racines/ha. Cette différence peut s'expliquer par le fait que des engrais différents ont été utilisés dans chacune des expériences.

Outre les paramètres de croissance et de production, les caractéristiques physicochimiques des racines récoltées ont été significativement influencées par les traitements. Il s'agit de l'humidité, des cendres, de l'acidité, du pH, des fibres, des sucres totaux, des protéines, des lipides, de HCN, de l'amidon, des glucides totaux et la valeur énergétique. Le taux d'humidité a varié entre 52,2 et 55,91 %. Bien que les traitements aient affecté le taux d'humidité des racines, toutes les valeurs enregistrées sont proches de celles se situant entre 54 et 73 % rapportées sur le manioc par Bakayoko *et al.* (2012). Les résultats ont montré également des variations significatives dans la teneur en cendres des racines de manioc selon le type d'engrais utilisé. Ces différences observées pourraient être dues à la nature des engrais appliqués. En effet, les engrais biologiques peuvent libérer des minéraux de manière plus lente et plus régulière, favorisant l'assimilation efficace par la plante (Fertial, 2017). En revanche, les engrais chimiques peuvent entraîner une absorption rapide mais aussi une accumulation potentielle de minéraux. Concernant le pH et l'acidité des racines, ils ont été affectés par les traitements. Les racines des plantes traitées avec le digestat (Traitement C) ont enregistré le pH le plus faible et l'acidité la plus élevée en comparaison au témoin. L'influence des engrais sur

la composition chimique des racines de manioc a déjà été rapportée (Taffouo *et al.*, 2006). Selon ces auteurs, l'utilisation de l'engrais composé NPK comme fumure de redressement permettrait une amélioration de la composition chimique et de la production de matière sèche des organes du manioc dans les zones rurales au Cameroun. Les fertilisants améliorent la fertilité des sols et par conséquent, agiraient sur la composition chimique des cultures. Pour la teneur en fibres, le digestat a obtenu la valeur la plus élevée (3,35 g/100 g), tandis que le traitement F a présenté celle la plus faible (1,84 g/100 g). Les fibres alimentaires jouent un rôle important dans la santé digestive, et la variation observée peut être attribuée aux différences dans la composition en nutriments des engrais appliqués (Smith *et al.*, 2021). En ce qui concerne les sucres totaux, les racines issues des plants traités avec le digestat ont obtenu la concentration la plus élevée (4,03 %), tandis que le traitement E et le témoin ont enregistré les teneurs les plus basses. La variabilité observée peut être due aux effets des engrais sur la composition physicochimique du manioc comme l'ont confirmé Saou *et al.* (2017). Les racines de manioc sont généralement reconnues pour leur faible teneur en protéines, habituellement entre 1 et 5 % selon des études antérieures (Stupak *et al.*, 2006 ; Cumbana *et al.*, 2007 ; Vernier *et al.*, 2018). Les résultats de cette étude confirment ces observations, montrant des taux de protéines variant de 0,35 à 1,81 %. Tout comme la teneur en protéines, les racines de manioc ont généralement une faible teneur en lipides (Ladeira *et al.*, 2013). Pour les teneurs en lipides, c'est le traitement H (Témoin) qui a montré la concentration la plus élevée (1,63 %), suivi par les traitements G et E. Quant au digestat, il a donné des racines ayant la teneur la plus faible en lipides. La variation observée peut refléter l'impact des engrais sur le métabolisme lipidique des plantes selon Smith *et al.* (2021). Le traitement C a présenté la concentration la plus basse en HCN (152,5 mg/kg MF) en comparaison aux autres traitements. La variation de la teneur en HCN dans les différents traitements serait due à la disponibilité et l'absorption des nutriments par les plantes. Ces observations sont appuyées par Kasereka *et al.* (2024), qui ont montré que l'utilisation d'engrais riches en azote accroît la teneur en HCN dans les racines de manioc. Imakumbili *et al.* (2020) ont également indiqué que les changements dans l'apport nutritionnel des plantes entraînent des processus métaboliques dans le manioc, y compris la production de glucosides cyanogéniques. Les valeurs de HCN obtenues dans cette étude dépassent celles de l'ordre de $106 \pm 12,13$ mg/kg rapportées par Koko *et al.* (2014) qui travaillaient sur la caractérisation physicochimique des racines de manioc de différentes variétés n'ayant subi aucun traitement, y compris le Yacé. Les taux élevés d'acide cyanhydrique dans les racines de manioc les rendent toxiques pour la consommation alimentaire. Ainsi, il est bon d'appliquer un traitement rigoureux aux racines de manioc pour réduire leur concentration en HCN au seuil de sécurité de 10 mg/kg recommandé

par le Codex Alimentarius. Un paramètre important est la teneur en glucides des racines de manioc. En effet, le manioc est cultivé principalement pour ses racines comestibles riches en glucides (Byju & Suja, 2020). Les teneurs élevées en glucides (95-97 % MS) enregistrées dans la présente étude confirment bien le fait que les racines en sont riches. Les traitements qui ont enregistré les valeurs les plus élevées ont été le digestat et le traitement G (NPK 7-21-7). Pour ce paramètre, c'est le traitement témoin qui a obtenu la valeur la plus faible (95,65 %). Ces variations peuvent être attribuées à l'impact des engrais sur le métabolisme des glucides, comme l'ont confirmé Taffouo *et al.* (2006), en révélant que l'utilisation de fertilisants sur les plantes de manioc augmente le taux de glucides. En outre, quel que soit le traitement, l'amidon a été le constituant principal des glucides totaux. Des valeurs comprises entre 84,41 et 85 % MS ont été enregistrées dans les racines de manioc lors de cette étude. Ces taux d'amidon sont cohérents avec ceux rapportés par Bradshaw (2010), qui a observé des teneurs d'amidon variant de 65 à 91 % dans les racines de manioc. L'amidon constitue une réserve énergétique essentielle pour les plantes (Labbani, 2021). Sa vitesse d'accumulation dans les organes est fortement influencée par les conditions environnementales telles que le régime de prélèvement, la température et la fertilité du sol (Zhang *et al.*, 2020). Par conséquent, le programme de fertilisation et la disponibilité en eau jouent un rôle important dans la synthèse d'amidon de qualité (Santisopasri *et al.*, 2001 ; Xie *et al.*, 2020 ; Omondi & Yermiyahu, 2021). La contribution des glucides au calcul de la valeur énergétique montre bien qu'ils sont des aliments simples indispensables. D'autres nutriments notamment les protéines et les lipides y contribuent fortement. Ainsi, une variation dans l'une quelconque des teneurs de ces macromolécules a une incidence sur la valeur énergétique. Dans la présente étude, les racines analysées sont très riches en énergie avec des valeurs comprises entre 400 et 404 kcal/100 g. Au niveau de la valeur énergétique, les racines issues du témoin ont enregistré les teneurs les plus élevées par rapport aux racines issues des autres traitements. La valeur énergétique d'un produit étant influencée par la concentration en glucides, protéines et en lipides, la variabilité observée résulterait donc des différences de teneurs en ces macronutriments.

En ce qui concerne les composés antioxydants, les résultats ont indiqué que l'utilisation d'engrais chimiques et de digestat a favorisé une augmentation des teneurs en polyphénols totaux et en flavonoïdes totaux dans les racines de manioc. En addition, le traitement fertilisant, a entraîné globalement une baisse de la teneur en tanins dans les racines étudiées. En effet, la plus faible teneur a été enregistrée avec le traitement E suivi du digestat ($4,61 \pm 0,02$ mg EAT/g). Des résultats similaires ont été rapportés par Barry & Manley (1984). Ces auteurs ont

montré que la fertilisation a baissé le taux de tanins chez les *Lotus pedunculatus*. Kambiré (2022) a également montré que la fertilisation des prairies pouvait entraîner une diminution des tanins contenus dans les plantes. Les tanins sont des composés phénoliques souvent associés à des propriétés antinutritionnelles dans certains contextes, bien qu'ils puissent également avoir des effets bénéfiques en tant qu'antioxydants (Bediakon, 2020).

Tout comme les composés antioxydants, les teneurs en minéraux (P, K, Ca, Na et Mg) ont varié de manière significative ($p < 0,05$) selon les traitements. Le digestat, par exemple, a donné des racines ayant des teneurs en potassium, calcium et sodium plus élevées que celles enregistrées avec le témoin. Cette variation est cohérente avec les observations de Taffouo *et al.* (2006), qui ont montré que l'application d'engrais enrichi en NPK augmente considérablement la matière sèche des racines de *Manihot esculenta*. Street & Opik (1976) ont également démontré que les minéraux absorbés jouent un rôle dans la création de la pression osmotique au niveau des racines. En effet, la création de la pression osmotique est essentielle pour faciliter l'absorption de l'eau et des minéraux dans les racines, influençant ainsi la santé et la croissance des plantes (Taiz & Zeiger, 2010). Ces résultats sont soutenus par Verma (2011), qui a indiqué que les engrais minéraux complets sont formulés pour répondre aux besoins nutritionnels des plantes afin de stimuler leur croissance.

Quant aux éléments traces métalliques rencontrés, les analyses statistiques ont révélé des différences significatives entre les différents échantillons. Certains éléments traces comme le nickel, le cuivre et le zinc ont enregistré des valeurs inférieures aux limites de toxicité dans les aliments rapportés par Kalonda *et al.* (2015). D'autres ETM comme le plomb, le cadmium et l'arsenic ont quant à eux obtenu des valeurs au-dessus des normes décrites par Kamilou *et al.* (2014) et FAO/OMS (2015). Cependant, ces valeurs ne représentent pas un véritable danger car cette variété de manioc est généralement transformée avant d'être consommée. Les racines de manioc au cours de la transformation passent par des opérations unitaires telles que le broyage, le pressage, la fermentation qui permettent de réduire considérablement ces teneurs à des niveaux raisonnables. En outre, les valeurs élevées de ces éléments traces métalliques obtenus dans les échantillons peuvent provenir du sol et du milieu de culture. Ces affirmations sont confirmées par Bolan *et al.* (2003). Selon ces auteurs, la présence des ETM dans la racine de manioc peut provenir du sol ou du milieu dans lequel s'est déroulé la culture. C'est également l'avis de certains auteurs montrant qu'un champ de manioc situé non loin des routes, expose le manioc à la poussière et aux gaz d'échappement des engins qui sont riches en métaux (Kunwar *et al.*, 2004 ; Mohamed & Ahmed, 2006). Aussi, l'utilisation de fertilisant peut-être une source

d'accumulation des métaux traces par les racines de manioc (Pereira & Sonnet, 2007 ; Kouamé, 2013 ; Capo-chichi *et al.*, 2019).

CONCLUSION PARTIELLE

Le présent travail a porté sur l'impact de la fertilisation tant biologique que chimique sur quelques paramètres agronomiques et physicochimiques du manioc. Il ressort de l'étude que parmi les paramètres de croissance étudiés seule la hauteur des plants de manioc a été significativement influencée par les traitements. Cette influence a été perceptible dans les deux premiers mois après l'apport de l'engrais minéral. Sur les paramètres de production, des effets significatifs des fertilisants ont été également enregistrés. Le digestat dosé à 75 % a permis d'obtenir le rendement le plus élevé (48,88 t/ha) tout comme le nombre de tubercules le plus grand (8,23 tubercules/plant). Les paramètres physicochimiques des racines de manioc ont été aussi influencés par les différents traitements appliqués. Une variation significative a été observée au niveau des paramètres tels que l'humidité, les cendres, le pH, les fibres, les sucres totaux, les protéines, les lipides, l'acide cyanhydrique, l'amidon, les glucides totaux, la valeur énergétique, ainsi que les composés antioxydants et les teneurs en minéraux. Le digestat a permis d'avoir des racines ayant les teneurs en glucides totaux, en macroéléments (sodium et Potassium), en antioxydants (Polyphénols et flavonoïdes totaux) plus élevées que celles des racines témoins. Aussi, les plus faibles teneurs en acide cyanhydrique et en tanins ont été obtenues avec ce digestat. Ces résultats reflètent ainsi l'impact direct des types d'engrais utilisés sur la composition et les propriétés des racines de manioc.

L'utilisation de l'engrais biologique (digestat dosé à 75 %) dans le traitement a non seulement affecté positivement la composition nutritionnelle des racines de manioc, mais a également souligné l'importance d'une approche durable dans l'agriculture pour maintenir la qualité des cultures tout en minimisant les impacts environnementaux. Cependant, la qualité nutritionnelle et organoleptique des produits issus des racines de manioc traitées avec le digestat doit encore être évaluée.

CHAPITRE IV : Effets du digestat d'effluents utilisé dans la culture du manioc sur la qualité de l'*attiéké* dérivé

Dans un contexte d'économie circulaire, un digestat issu de la méthanisation d'effluents de fabrication d'*attiéké* a été épandu dans la culture du manioc. Une fois récoltées, les racines de manioc ont été transformées en *attiéké* (Annexe 2). Cette partie du travail a pour objectif de déterminer l'impact de ce digestat sur la qualité tant physicochimique que sensorielle de l'*attiéké* dérivé. Pour cela, des échantillons d'*attiéké* provenant de racines de manioc traitées avec un digestat dosé à 75 % ont été caractérisés et comparés à un *attiéké* témoin obtenu suivant le même processus de fabrication. Les données collectées ont été soumises à des traitements statistiques.

1. RESULTATS

1.1. Caractéristiques physicochimiques des échantillons d'*attiéké*

Les résultats des analyses physicochimiques sont consignés dans le Tableau XXVIII. L'analyse statistique a montré que les valeurs du pH, de l'acidité, de la teneur en cendres, du taux de protéines, des glucides totaux, des flavonoïdes et des tanins n'ont pas varié significativement d'un échantillon d'*attiéké* à un autre.

Quant aux taux d'humidité, aux fibres, sucres totaux, lipides, valeurs énergétiques et aux polyphénols, les analyses statistiques ont révélé une différence significative entre les deux échantillons. L'échantillon d'*attiéké* issu du traitement C a obtenu les valeurs les plus élevées en humidité ($48,85 \pm 0,42$ % contre $47,42 \pm 0,42$ %), et en polyphénols ($9,10 \pm 0,10$ mg EAG/g extrait sec contre $8,55 \pm 0,05$ mg EAG/g extrait sec). L'échantillon H a enregistré également les valeurs les plus élevées, en fibres ($1,47 \pm 0,01$ % contre $1,15 \pm 0,05$ %), en sucre totaux ($1,25 \pm 0,01$ % contre $1,06 \pm 0,01$ %), en lipides ($0,86 \pm 0,01$ % contre $0,22 \pm 0,01$ %) et en valeur énergétique ($401,64 \pm 0,42$ kcal/100 g contre $395,23 \pm 0,46$ kcal/100 g).

1.2. Teneurs en éléments traces métalliques (ETM) des échantillons d'*attiéké*

Les concentrations des éléments traces métalliques dans les *attiékés* produits sont consignées dans le Tableau XXIX. L'analyse statistique a révélé des différences significatives entre les échantillons d'*attiéké*. Ces différences portent sur tous les éléments quantifiés sauf le plomb. Pour le fer, les valeurs ont varié de $0,0276 \pm 0,0003$ (*Attiéké* C) à $0,0297 \pm 0,0001$ mg/kg (*Attiéké* H). En ce qui concerne le chrome, elles ont oscillé de $0,0277 \pm 0,0001$ (*Attiéké* H) à

Résultats et Discussion

0,0595 ± 0,0002 mg/kg (*Attiéké C*). Pour le mercure, les concentrations se situaient entre 0,0180 ± 0,0006 (*Attiéké H*) et 0,0254 ± 0,0002 mg/kg (*Attiéké C*).

Tableau XXVIII : Paramètres physicochimiques des deux échantillons d'*attiéké* issus des racines traitées avec le digestat et des racines témoins

Paramètres	<i>Attiéké C</i>	<i>Attiéké H</i>	Normes NI 484 (CODINORM, 2018)
Humidité (%)	48,85 ± 0,42 ^b	47,42 ± 0,43 ^a	45 à 55 %
pH	4,53 ± 0,10 ^a	4,63 ± 0,01 ^a	4 à 5
Acide lactique* (%)	1,74 ± 0,19 ^a	1,59 ± 0,05 ^a	3,5 à 4,8 %
Fibres * (%)	1,15 ± 0,05 ^a	1,47 ± 0,01 ^b	1 %
Sucres totaux* (%)	1,06 ± 0,01 ^a	1,25 ± 0,01 ^b	-
Cendres* (%)	0,46 ± 0,09 ^a	0,44 ± 0,14 ^a	<1,4 %
Protéines* (%)	0,19 ± 0,01 ^a	0,19 ± 0,01 ^a	1 - 2 %
Lipides* (%)	0,22 ± 0,01 ^a	0,86 ± 0,01 ^b	-
Glucides totaux* (%)	98,29 ± 0,07 ^a	98,11 ± 0,14 ^a	-
Valeur énergétique* (kcal/100 g)	395,23 ± 0,46 ^a	401,64 ± 0,42 ^b	300 - 400 kcal/100 g MS
Polyphénols* (mg EAG/g)	9,10 ± 0,10 ^b	8,55 ± 0,05 ^a	-
Flavonoïdes* (mg EQ/g)	0,15 ± 0,01 ^a	0,15 ± 0,01 ^a	-
Tanins* (mg EAT/g)	0,94 ± 0,01 ^a	0,91 ± 0,02 ^a	-

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, Test de Student).

Résultats et Discussion

Attiéké C : *Attiéké* issu des racines traitées avec du digestat dosé à 75 % ; *Attiéké H* : *Attiéké* issu des racines témoins n'ayant subi de traitement ; EAG : Equivalent acide gallique ; EQ : Equivalent quercétine ; EAT : Equivalent acide tannique ; pH ; Potentiel d'hydrogène ; (-) : Valeur non déterminée ; (*) : Teneurs exprimées par rapport à la matière sèche ; MS : Matière sèche.

Quant à l'arsenic, il a présenté des valeurs comprises entre $0,0066 \pm 0,002$ (*Attiéké C*) et $0,0520 \pm 0,0011$ mg/kg (*Attiéké H*). Concernant le cadmium, les valeurs sont comprises entre $0,0520 \pm 0,0006$ (*Attiéké C*) et $0,0633 \pm 0,0002$ mg/kg (*Attiéké H*). Pour le nickel, ses teneurs ont varié entre $0,0452 \pm 0,0012$ (*Attiéké C*) à $0,0359 \pm 0,0009$ mg/kg (*Attiéké H*). En outre, les concentrations de cuivre sont situées entre $0,0447 \pm 0,0001$ (*Attiéké C*) et $0,0541 \pm 0,0002$ mg/kg (*Attiéké H*), tandis que celles du zinc, vont de $0,0307 \pm 0,0001$ (*Attiéké H*) à $0,0866 \pm 0,0002$ mg/kg (*Attiéké C*). En revanche, aucune différence significative n'a été observée pour les concentrations de plomb entre les différents échantillons d'*attiéké*. La teneur en plomb dans les échantillons d'*attiéké* était de $0,0209 \pm 0,0011$ mg/kg. Les teneurs en ETM sont conformes aux normes (Tableau XXIX).

Tableau XXIX : Composition en éléments traces métalliques (ETM) des échantillons d'*attiéké* issus des racines traitées avec le digestat et des racines témoins

Paramètres (mg/kg MS)	<i>Attiéké C</i>	<i>Attiéké H</i>	Références
Fer	$0,0276 \pm 0,0003^a$	$0,0297 \pm 0,0001^b$	-
Chrome	$0,0595 \pm 0,0002^b$	$0,0277 \pm 0,0001^a$	-
Mercure	$0,0254 \pm 0,0002^b$	$0,0180 \pm 0,0006^a$	-
Arsenic	$0,0066 \pm 0,0020^a$	$0,0520 \pm 0,0011^b$	0,1 mg/kg (Kamilou <i>et al.</i> , 2014)
Cadmium	$0,0520 \pm 0,0006^a$	$0,0633 \pm 0,0002^b$	0,1 mg/kg (Capo-Chichi <i>et al.</i> , 2019)
Nickel	$0,0452 \pm 0,0012^a$	$0,0359 \pm 0,0009^b$	1-50 mg/kg (Kalonda <i>et al.</i> , 2015)
Cuivre	$0,0447 \pm 0,0001^a$	$0,0541 \pm 0,0002^b$	100 mg/kg (Kalonda <i>et al.</i> , 2015)
Zinc	$0,0866 \pm 0,0002^b$	$0,0307 \pm 0,0001^a$	1-100 mg/kg (Kalonda <i>et al.</i> , 2015)
Plomb	$0,0209 \pm 0,0011^a$	$0,0209 \pm 0,0011^a$	0,1 mg/kg (Capo-Chichi <i>et al.</i> , 2019)

Les valeurs avec des lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont statistiquement différentes ($p < 0,05$, Test de Student).

Attiéké C : *Attiéké* issu des racines traitées avec du digestat dosé à 75 % ; *Attiéké H* : *Attiéké* issu des racines témoins n'ayant subi de traitement ; (-) : Valeur non déterminée ; MS : Matière sèche.

1.3. Analyse sensorielle des échantillons d'*attiékés*

1.3.1. Caractéristiques du jury

Le panel était constitué de 60 personnes dont 41 Femmes et 19 Hommes. Leur âge varie entre 18 et 51 ans (Tableau XXX). La classe d'âge comprise entre [18 ; 30 ans[représente 90 % du panel et l'autre classe]30 ; 51 ans] est estimée à 10 %.

Par ailleurs, les tests d'indépendance de khi-deux ont révélé qu'il n'existe pas de lien entre l'âge des panélistes et les notes accordées aux différentes appréciations hédoniques ($p > 0,05$). Il en est de même pour la liaison entre le sexe des panélistes et les notes attribuées aux différentes appréciations organoleptiques (Tableaux XXXI). Les notes ne dépendent ni du genre, ni de l'âge des panélistes.

Tableau XXX : Caractéristiques démographiques des consommateurs d'*attiéké* formant le jury

Caractéristiques		Effectifs (%)	
Age (années)	[18 ; 30[54	90
	[30 ; 51]	6	10
Sexe	Hommes	19	31,66
	Femmes	41	68,34

Tableau XXXI : Résultats du test d'indépendance de Khi- deux entre les variables caractérisant les panelistes et les appréciations hédoniques évaluées au niveau des échantillons d'*attiéké* produit

Caractéristiques des panélistes	Probabilités associées aux appréciations hédoniques				
	Aspect visuel	Odeur	Goût	Texture	App. Globale
Age	0,86	0,08	0,88	0,06	0,34
Sexe	0,46	0,26	0,52	0,39	0,44

App. Globale : Appréciation Globale ; les valeurs du tableau sont des probabilités p de test. Lorsque $p > 0,05$, les deux variables croisées sont indépendantes.

1.3.2. Appréciations des échantillons d'*attiéké*

Les notes attribuées aux différentes appréciations hédoniques par les dégustateurs des échantillons d'*attiékés* sont présentées dans le tableau XXXII. Concernant l'appréciation visuelle, les notes sont comprises entre $6,62 \pm 0,69$ et $6,72 \pm 0,71$. Celles du goût et de l'odeur sont respectivement comprises entre $6,47 \pm 0,91$ et $6,73 \pm 0,68$ et entre $6,05 \pm 1,08$ et $6,17 \pm 0,81$. Quant à la texture, elle a enregistré des notes comprises entre $6,82 \pm 0,81$ et $6,86 \pm 0,96$. Les résultats des tests hédoniques ont révélé que l'*attiéké* C produit avec les racines traitées a les mêmes caractéristiques organoleptiques que l'*attiéké* H issu des racines témoins à l'exception de l'appréciation globale. En effet, l'analyse statistique portant sur l'appréciation globale a révélé une différence significative ($p < 0,05$) entre les échantillons d'*attiéké* évalués. L'*attiéké* C a obtenu une note d'appréciation globale de $7,35 \pm 0,71$ contre $6,86 \pm 0,57$ pour l'*attiéké* H. Cet *attiéké* a donc globalement été plus apprécié que l'*attiéké* H.

Tableau XXXII : Notes attribuées par le jury aux différentes appréciations hédoniques des échantillons d'*attiéké* produits

Paramètres	<i>Attiéké</i> C	<i>Attiéké</i> H
Appréciation globale	$7,35 \pm 0,71^b$	$6,86 \pm 0,57^a$
Aspect visuel	$6,72 \pm 0,71^a$	$6,62 \pm 0,69^a$
Goût	$6,73 \pm 0,68^a$	$6,47 \pm 0,91^a$
Odeur	$6,17 \pm 0,81^a$	$6,05 \pm 1,08^a$
Texture	$6,82 \pm 0,81^a$	$6,86 \pm 0,96^a$

Les valeurs sont les moyennes de notes attribuées par les panélistes pour chaque appréciation hédonique. Les valeurs portant les mêmes lettres alphabétiques sur la même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (Test de Student). *Attiéké* C : *Attiéké* issu des racines traitées avec du digestat dosé à 75 % ; *Attiéké* H : *Attiéké* issu des racines témoins n'ayant subi de traitement.

2. DISCUSSION

La détermination des paramètres physicochimiques de l'*attiéké* permet de montrer sa qualité nutritionnelle. C'est donc à cette fin que certains paramètres entre autres le taux d'humidité, le pH, l'acidité titrable, les fibres, les sucres totaux, la teneur en cendres, le taux de protéines, les glucides totaux, les lipides, la valeur énergétique, les polyphénols, les flavonoïdes, les tanins et les ETM ont été déterminés dans des échantillons d'*attiéké*.

L'échantillon d'*attiéké* issu du traitement C a obtenu une teneur en humidité ($48,85 \pm 0,42$ %) plus élevée que l'échantillon témoin ($47,42 \pm 0,42$ %). Toutefois, ces valeurs d'humidité sont conformes à la norme Ivoirienne NI 484 (CODINORM, 2018) qui recommande un taux compris entre 45 à 55 %. Koko *et al.* (2018) ont rapporté des teneurs en eau de l'ordre de 51,46 % dans l'*attiéké* produit à Daloa, dans le centre ouest de la Côte d'Ivoire. La variation du taux d'humidité dans les échantillons peut être due aux différentes opérations unitaires du processus de fabrication de l'*attiéké*. En effet, selon Guira (2013), pendant la production de l'*attiéké*, trois opérations affectent le taux d'humidité de l'*attiéké* final. Il s'agit notamment du pressage de la pâte, du pré-séchage des granules et de la cuisson.

Concernant le pH, les deux échantillons d'*attiéké* ont enregistré des valeurs statistiquement identiques (4,53 - 4,63). Ces valeurs de pH acide sont conformes à la norme Ivoirienne NI 484 (CODINORM, 2018) qui recommande pour l'*attiéké* un pH compris entre 4 et 5. Tout comme le pH, l'acidité n'a pas varié significativement d'un échantillon d'*attiéké* à l'autre. Les valeurs d'acidité des *attiéké* évalués (1,59 - 1,74 %) sont proches de celles rapportées par Djeni *et al.* (2011) et Yéboué *et al.* (2017), qui sont respectivement de 1,71 et 1,52 % dans l'*attiéké*. Ces valeurs sont inférieures à celles comprises entre 3,5 et 4,8 %, recommandées par la norme Ivoirienne NI 484 (CODINORM, 2018). Selon Yéboué *et al.* (2017), cette acidité obtenue dans l'*attiéké* est proportionnelle au temps de séjour de la pâte de manioc pendant le processus de production de l'*attiéké*. Aussi, selon Adaye (2020), l'acidité dans l'*attiéké* provient également du « mangnan », un ferment à base de manioc fermenté ajouté pendant le broyage des racines de manioc épluchées. Quant aux teneurs en cendres des échantillons d'*attiéké* analysés dans cette étude, les valeurs obtenues sont statistiquement identiques. En outre, elles sont conformes à la norme ivoirienne NI 484 (CODINORM, 2018), exigeant des valeurs en sels minéraux inférieures à 1,4 % de matière sèche.

Par ailleurs, des taux de protéines compris entre 1 % et 2 % de matière sèche sont recommandés par la norme Ivoirienne NI 484 (CODINORM, 2018). A ce propos, les teneurs en protéines des deux types d'*attiéké* évalués dans la présente étude sont conformes à cette

norme. Les faibles teneurs observées dans les échantillons d'*attiéké*, comme l'on devait s'y attendre, peuvent être dues à la pauvreté en protéines des racines de manioc utilisées comme matière première. En effet, l'*attiéké* est préparé à partir du manioc qui est pauvre en protéines (Yéboué *et al.*, 2017). Selon Favier (1977), certaines opérations unitaires telles que l'épluchage contribuent à la réduction de la teneur en protéines dans l'*attiéké* obtenu en fin de procédé.

Contrairement aux teneurs en protéines et en cendres, les taux de matières grasses ont varié significativement d'un échantillon d'*attiéké* à un autre. L'échantillon d'*attiéké* produit à partir des racines traitées a obtenu la valeur la plus basse ($0,22 \pm 0,01$ %) pendant que celui issu des racines témoins a enregistré la valeur la plus élevée ($0,86 \pm 0,01$ %). Des valeurs similaires ($0,15 - 3,28$ %) ont été rapportées par Guira (2013) qui travaillait sur la qualité de l'*attiéké* issu de différentes pâtes de manioc. Aussi, Adaye (2020) avait trouvé dans l'*attiéké* une teneur moyenne en matière grasse variant entre $0,07 \pm 0,01$ et $0,53 \pm 0,05$ %. Ces faibles valeurs de lipides et protéines confirment bien que l'*attiéké* est un aliment principalement glucidique et pauvre en matières grasses, en protéines et en cendres (Yéboué *et al.*, 2017).

Au niveau de la teneur en fibres, les échantillons analysés diffèrent significativement. L'échantillon issu du traitement C a enregistré la plus faible valeur ($1,15 \pm 0,05$ %) alors que celui issu du témoin a obtenu la plus élevée ($1,47 \pm 0,01$ %). Pourtant, l'on devait plutôt s'attendre à voir l'échantillon d'*attiéké* provenant des racines traitées avec le digestat enregistrer la teneur la plus élevée en fibres. En effet, l'*attiéké* dérivant des racines ayant la teneur en fibres la plus élevée devrait avoir la valeur la plus élevée. Cela n'a pas été le cas puisque c'est l'échantillon d'*attiéké* témoin qui a enregistré la teneur en fibres la plus élevée. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que des opérations unitaires dont le vannage, ont plutôt laissé plus de fibres dans la semoule dérivant des racines témoins. Toutefois, ces teneurs en fibres sont proches de celle de l'ordre de $1,26 \pm 0,03$ % rapportée par Yéboué *et al.* (2017) dans l'*attiéké*. D'ailleurs, la norme Ivoirienne NI 484 (CODINORM, 2018) recommande une valeur d'environ 1 % de fibres alimentaires dans l'*attiéké*.

Selon Yéboué *et al.* (2017), les mets issus de la transformation du manioc sont constitués de faibles quantités de sucres totaux. C'est le constat qui a été fait dans la présente étude avec des teneurs de l'ordre de 1-1,25 %. Les teneurs en glucides totaux des deux échantillons analysés sont statistiquement identiques. Les glucides totaux constituent plus de 98 % de la matière sèche des *attiékés* étudiés. Cette proportion élevée en glucides totaux confirme bien le fait que l'*attiéké* est un aliment essentiellement glucidique et énergétique. La consommation de 100 g de l'*attiéké* produit fournit une énergie comprise entre 395 et 402 kcal. Concernant la valeur énergétique, les analyses statistiques ont révélé une différence significative entre les

échantillons d'*attiéké*. La variation énergétique entre les échantillons dans cette étude résulte des variations entre les teneurs des différents paramètres permettant de déterminer les valeurs énergétiques. Ainsi, hormis la teneur en matière grasse, les teneurs en glucides et protéines sont statistiquement identiques. Cette variation de la valeur énergétique entre les échantillons peut donc provenir des teneurs en lipides. Ces affirmations sont ainsi confirmées par Guira (2013) qui souligne une augmentation de la valeur énergétique de l'*attiéké* par la teneur en lipides. Les valeurs énergétiques enregistrées sont semblables à celles de Yéboué *et al.* (2017) qui ont obtenu une valeur de $396,93 \pm 0,10$ kcal/100 g de matière sèche dans l'*attiéké*. En outre, ces valeurs concordent avec celles de 300 - 400 kcal/100 g MS recommandées par la norme Ivoirienne NI 484 (CODINORM, 2018).

Concernant les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins déterminés dans l'*attiéké*, les teneurs enregistrées sont inférieures à celles quantifiées dans les racines fraîches. Ces différences seraient liées à des pertes durant le processus de transformation du manioc en *attiéké*. Ces affirmations corroborent celles de Gogbeu *et al.* (2011) qui ont observé une élimination pendant le pressage de la pâte de manioc broyée, des composés responsables du brunissement enzymatique du manioc après trois jours de récolte. Cela est également confirmé par Hongbété *et al.* (2009), qui ont révélé une élimination des composés phénoliques du manioc pendant le pressage. Par ailleurs, l'*attiéké* issu des racines traitées avec le digestat a obtenu la teneur la plus élevée en polyphénols en comparaison à l'*attiéké* témoin. Ces différences significatives de teneurs en polyphénols totaux entre les deux échantillons d'*attiéké* résulteraient des différences existantes entre les racines utilisées comme matières premières pour la transformation. Par conséquent, l'utilisation du digestat d'effluent de manioc a amélioré la teneur en polyphénols de l'*attiéké* dérivé.

Quant aux éléments traces métalliques rencontrés, les analyses statistiques ont révélé des différences significatives entre les deux types d'*attiéké* produit. Toutefois, les valeurs d'ETM déterminées sont toutes inférieures aux limites de toxicité dans les aliments rapportés par Kamilou *et al.* (2014), Kalonda *et al.* (2015) et Capo-Chichi *et al.* (2019). Selon Dauguet *et al.* (2011), les éléments traces métalliques sont logés au troisième rang des sources à risque pour l'alimentation animale après les mycotoxines et les microorganismes. Ainsi, la consommation d'aliment riche en ETM pourrait donc provoquer des dysfonctionnements chez l'homme (Li *et al.*, 2012). Les faibles valeurs d'ETM enregistrées dans cette étude ne peuvent influencer la santé des consommateurs.

Par ailleurs, les *attiékés* ont été soumis à une évaluation hédonique. Le jury utilisé était majoritairement composé de femmes (68,34 %). En outre, la tranche d'âge comprise entre 18 et 30 ans a représenté 90 % des panélistes. Ces caractéristiques du jury n'ont pas affecté significativement ($p > 0,05$) les notes attribuées aux échantillons d'*attiéké*. En effet, les probabilités de test de khi-deux réalisé entre les variables caractérisant d'une part les consommateurs et d'autre part les appréciations hédoniques, ont été toutes supérieures à 5 %. Le jury caractérisé est donc de qualité. Par conséquent, les différentes notes attribuées par les consommateurs ne dépendent ni du genre ni de la tranche d'âge.

En ce qui concerne les tests organoleptiques réalisés sur les différents échantillons d'*attiéké*, il ressort que l'*attiéké* C issu des traitements avec le digestat et l'*attiéké* témoin ne présentent pas de différence significative ($p < 0,05$) pour les descripteurs organoleptiques retenus, excepté l'appréciation globale. Au niveau de cette appréciation hédonique, l'*attiéké* C a été le plus apprécié avec une note de $7,35 \pm 0,71$ et l'*attiéké* H a enregistré une note de $6,89 \pm 0,57$. Cette différence perçue par les panélistes peut être reliée aux différences enregistrées au niveau de certains paramètres physicochimiques déterminés dans les *attiékés* dont la teneur en fibres. En effet, l'*attiéké* C qui a été le plus apprécié a enregistré la teneur en fibres la plus faible ($1,15 \pm 0,05$ %). Généralement, l'absence de fibres est un facteur d'appréciation de la qualité de l'*attiéké* par les consommateurs (Assanvo *et al.*, 2019). Concernant l'aspect visuel, le goût et l'odeur des *attiékés*, les consommateurs les ont appréciés comme étant plutôt agréable quel que soit l'échantillon d'*attiéké*. Quant à la texture, elle a été appréciée comme agréable. Les racines issues des plants de manioc traités avec le digestat sont aptes à la transformation en *attiéké*. Elles ont été transformées avec succès en *attiéké* apprécié par les consommateurs.

CONCLUSION PARTIELLE

Cette étude a été menée en vue de déterminer l'aptitude des racines traitées avec le digestat à la transformation en *attiéké*. L'impact du digestat issu de la méthanisation d'effluents de manioc sur la qualité tant physicochimique que sensorielle de l'*attiéké* a également été déterminé. Il en ressort que les racines ont toutes été transformées en *attiéké* avec succès. Les *attiékés* produits ont un pH, des teneurs en cendres, en protéines et en glucides totaux identiques. Ils diffèrent par quelques paramètres physicochimiques dont les teneurs en eau, en fibres, en sucres totaux, en lipides, en polyphénols totaux et la valeur énergétique. L'*attiéké* C issu des racines traitées avec le digestat a enregistré les valeurs les plus élevées en humidité et en polyphénols totaux. Sa teneur relativement faible en fibres a été un atout lors de la dégustation par les consommateurs. Par ailleurs, cet *attiéké* a été globalement plus apprécié par les panélistes. En outre, les *attiékés* ont présenté une innocuité au regard de leurs faibles teneurs en ETM. Le digestat a donc amélioré la qualité nutritionnelle et sensorielle de l'*attiéké*. Cela suggère donc un potentiel pour valoriser les effluents de manioc.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude a été menée en vue de valoriser le digestat d'effluents produit avec un procédé de méthanisation en fonctionnement continu dans la production de manioc de hautes qualités nutritionnelle, technologique et organoleptique. Les résultats ont révélé que le digestat renferme des éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium) et présente une innocuité au regard de l'absence de germes pathogènes et des teneurs en éléments traces métalliques conformes à la réglementation. Appliqué dans les conditions optimales (taux de dilution de 75 % et volume de 1,25 L par plant de manioc), il améliore significativement les rendements en manioc, atteignant 50,24 t/ha avec un taux d'accroissement de plus de 100 %. Les paramètres physicochimiques des racines de manioc ont été influencés. Ainsi, le digestat a permis d'avoir des racines ayant les teneurs en glucides totaux, en macroéléments (potassium et sodium) et en antioxydants (polyphénols et flavonoïdes totaux) plus élevées que celles des racines témoins. Aussi, les plus faibles teneurs en acide cyanhydrique et en tanins ont été obtenues avec ce digestat. Par ailleurs, les racines ont toutes été transformées en *attiéké* avec succès. Toutefois, ces *attiékés* diffèrent par quelques paramètres physicochimiques dont les teneurs en eau, fibres, sucres totaux, lipides, polyphénols totaux et la valeur énergétique. L'*attiéké* C issu des racines traitées avec le digestat a enregistré les valeurs les plus élevées en polyphénols totaux. Sa teneur relativement faible en fibres a été un atout lors de la dégustation par les consommateurs. Il a été globalement plus apprécié par les panélistes. Tout comme le rendement en racines de manioc, le digestat a amélioré la qualité nutritionnelle et sensorielle de l'*attiéké*. Ces résultats confirment que l'utilisation du digestat peut non seulement fermer le cycle de production agricole mais également apporter une valeur ajoutée dans la chaîne agroalimentaire. Cette étude intègre parfaitement les principes d'une économie circulaire dans la filière manioc. Ce système repose sur une gestion efficace des déchets agricoles, la production de fertilisants naturels et l'amélioration des productions alimentaires, tout en réduisant les impacts environnementaux.

En perspectives, il conviendrait de mener d'autres investigations notamment de :

- ✓ déterminer d'autres potentialités technologiques des racines traitées au digestat ;
- ✓ déterminer la date de durabilité maximale du digestat, estimer son coût de production et sensibiliser les acteurs agricoles à la production de digestat à partir d'effluent de manioc ;
- ✓ caractériser le digestat produit à partir d'effluents de manioc neutralisés par d'autres bases que l'urine à des fins de comparaison ;

Conclusion générale et perspectives

- ✓ étendre l'étude à d'autres zones agroécologiques pour ajuster éventuellement les doses et fréquences d'application du digestat en fonction des différents types de sols et des conditions climatiques.

REFERENCES

- Adaye A. A. (2020). Production et conservation de la semoule de manioc (attiéké), dans la ville de Bouaké (Côte d'Ivoire). *Revue Espace, Territoires, Sociétés et Santé*, 3(5) : 93-108.
- ADEME. (2011). Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Rapport final réalisée par RITTMO Agroenvironnement, Uteam, FIBL, INERIS, LDAR pour le compte de l'ADEME et le Ministère de l'Agriculture. Marché ADEME n° 0906C0053, 250 p. https://www.methafrance.fr/sites/default/files/2021-07/95_qualite_digestats_ademe_octobre_2011.pdf
- Adjoumani Y.J. (2021). Activation acide des argiles de Dabou et Katiola (Côte d'Ivoire) pour le traitement des eaux usées : élimination des ions dihydrogénophosphate ($H_2PO_4^-$), nitrate (NO_3^-) et cadmium (Cd^{2+}). Institut National Polytechnique FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY, Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), 215 p.
- AGASA (2011). Le manioc sous toutes ses formes de consommation. Rapport d'étude du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage, de la Pêche et de l'Alimentation du Gabon, 15 p. <https://www.agasa.site/first/wp-content/uploads/2020/09/DERSP-Manioc-et-toutes-formes-de-consommation-en-Afrique-2..pdf>
- Akanji A.O., Adeyefa I., Charles-Davies M. & Osotimehin B.O. (1990). Plasma glucose and thiocyanate responses to different mixed cassava meals in non-diabetic Nigerians. *European Journal of Clinical Nutrition*, 44 : 71-77.
- Akanza P.K., N'Zué B. & Anguété K. (2002). Influence de la fumure minérale et de la litière de volaille sur la production de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 14(2) : 79 - 89.
- Akanza P.K. & Yao-Kouamé A. (2011). Fertilisation organo-minérale du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) et diagnostic des carences du sol. *Journal of Applied Biosciences*, 46 : 3163-3172.
- Akely P.M.T. (2012). Influence de la fermentation contrôlée du pressage et de la granulation mécanisée du manioc (*Manihot esculenta*, Crantz) râpé sur les caractéristiques physico-chimiques et sensorielles de l'attiéké. Thèse unique, N°183, UFR Science et Technologie des Aliments, Université Nangui ABROGOUA, Abidjan (Côte d'Ivoire), 150 p.

- Akerholm M., Hinterstoisser B. & Salmén L. (2004). Characterization of the crystalline structure of cellulose using static and dynamic FT-IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 339(3):569-578.
- Akpingny K.L. & Koulou N. (2017). Fiche technicoéconomique du manioc. Direction d'Appui aux Filières Agricoles / Novembre 2017, 8 p. <http://projet.anader.ci/webanader2017/sara2017/fichetech/fiche%20technico-economique%20du%20manioc.pdf>
- Almansour E., Bonnet J-F. & Heredia M. (2011). Potentiel de production de biogaz à partir de résidus agricoles ou de cultures dédiées en France. *Sciences Eaux & Territoires*, 4 : 64-72.
- Angeli J.R.B. (2019). Etude de faisabilité de la micro-méthanisation par co-digestion à l'échelle des quartiers. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique. Thèse de Doctorat, Université BRETAGNE LOIRE, Renne (France), 204 p.
- Anonyme 1. (2025). Manuel de formation sur la production et la transformation du manioc. 97 p. https://www.iita.org/wp-content/uploads/2022/02/YEASA-Cassava-manual_French.pdf. Consulté le 5 Août 2025.
- Anonyme 2. (2024). Données climatiques de Daloa : 1978 – 2024. <https://www.tutiempo.net/clima/ws-655600.html>. Consulté le 14 Juin 2024.
- Appels L., Baeyens J., Degève J. & Dewil R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6) :755-781.
- AOAC. (1990). Official methods of analysis, 15th Edn. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC., 774 p.
- AOAC. (2000). Official methods of Analysis of AOAC International. 17thed., AOAC International, Washington D.C., 2200 p.
- Asiedu J.J. (1991). La transformation des produits agricoles en zone tropicale. Approche technologique. *Edition Karthala*, Paris (France), 335 p.
- Askri A. (2015). Valorisation des digestats de méthanisation : Effet sur les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote. Thèse de Doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, AgroParisTech, Paris, France, 234 p.

- Assanvo J.B., Agbo G.N., Behi Y.E.N., Coulin P. & Farah Z. (2002). La microflore du ferment de manioc pour la production de l'attiéké adjoukrou à Dabou (Côte d'Ivoire). *Revue Internationale des Sciences de la Vie et de la Terre* : 286-299.
- Assanvo J.B., Agbo G.N., Behi Y.E.N., Coulin P. & Farah Z. (2006). Microflora of traditional starter made from cassava for attiéké production in Dabou (Côte d'Ivoire). *Food Control*, 17: 37- 41.
- Assanvo J.B., Agbo G.N., Coulin P., Heuberger C. & Farah. Z. (2019). Etude comparative de 3 attiéké traditionnels et d'un attiéké commercial (Garba) : Enquête sur les méthodes de production et les caractéristiques physico-chimiques de l'inoculum de manioc et des différents produits finis. *Revue Internationale d'Innovation et d'Etudes Appliquées*, 26(4) :1108-1133.
- Atwater W. & Rosa E. (1899). A new respiratory colorimeter and the conservation of energy in human body. *Physiological Reviews*, 9: 214-251.
- Bainbridge Z., Tomlins K. & Westby A. (1996). Methods for assessing quality characteristic of non-gains starch (Part 3. Laboratory methods). *Natural Resources Institute*, Chatham (United Kingdom), 16-18.
- Bakayoko S., Nindjin C., Dao D., Tschannen A., Girardin O. & Assa A. (2007). Fumure organique et productivité du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 19(3) : 271-279.
- Bakayoko S., Kouadio K.K.H., Soro D., Tschannen A., Nindjin C., Dao D. & Girardin O. (2012). Rendements en tubercules frais et teneurs en matière sèche de soixante-dix nouvelles variétés de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) cultivées dans le centre de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 14(2) : 1961-1977.
- Bala N. (2011). Strategies for elimination of cyanogens from cassava for reducing toxicity and improving food safety. *Food and Chemical Toxicology*, 49: 690-693.
- Balagapolan C., Padmaja G., Nanda S.K. & Moorthy S.N. (1988). In Cassava nutrition and toxicity. Cassava in food feed and industry. CRC Press, Boca Raton (USA), 13-36.
- Ballot C.S.A., Semballa S., Atakpama W., Yangakola T.M., Blavet D., Zinga I., Wala K., Batawila K. & Akpagana K. (2016). Effet de fumures minérales sur le rendement et la qualité organoleptique du manioc (*Manihot Esculenta* Crantz) dans la zone de savane au Centre-Sud de Centrafrique. *European Scientific Journal*, 12(6) : 185-206.

- Baral K.R., Arthur E., Olesen J.E. & Petersen S.O. (2016). Predicting nitrous oxide emissions from manure properties and soil moisture: An incubation experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 97 : 112-120.
- Bediakon B.K.D. (2020). Caractéristiques ethnobotaniques et potentialités nutritives de quelques plantes spontanées comestibles soumises à deux traitements technologiques dans la Région d'Agboville (Sud, Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR Agroforesterie, Université Jean LOROUGNON GUEDE Daloa, Côte d'Ivoire, 214 p.
- Biaou O.D.B., Saidou A., Bachabi F-X., Padonou G.E. & Balogoun I. (2017). Effet de l'apport de différents types d'engrais organiques sur la fertilité du sol et la production de la carotte (*Daucus carota* L.) sur sol ferrallitique au sud Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5) : 2315 – 2326.
- Barry T.N. & Manley T.R. (1984). The role of condensed tanins in the nutritional value of *Lotus pedunculatus* for sheep: 2. Quantitative digestion of carbohydrates and proteins. *British Journal of Nutrition*, 51(3) : 493-504.
- Bertrand G. & Thomas P. (1910). Guide pour les manipulations de Chimie Biologie. *Dunod*, Paris (France), 468 p.
- Bokanga M., Ekanayake I.J., Dixon A.G.O. & Porto M.C.M. (1994). Genotype-environment interactions for cyanogenic potential in cassava. *Acta Horticulturae*, 375 : 131-139.
- Bolan N.S, Adriano D.C., Duraisamy P., Mani A. & Arulmozhiselvan K. (2003). Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. Effect of phosphate addition. *Plant and Soil*, 250: 83-94.
- Bradshaw J.E. (2010). Root and tuber crops. New York: Springer, 298 p.
- Bryant M.P., Campbell L.L., Reddy C.A. & Crabill M.R. (1977). Growth of desulfovibrio in lactate or ethanol media low in sulfate in association with H₂-utilizing methanogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 33(5):1162-1169.
- Byju G. & Suja G. (2020). Mineral nutrition of cassava. In : Progrès en Agronomie. *Advances in Agronomy*, 159 : 169-235.
- Cardoso A.P., Mirione E., Ernesto M., Massaza F., Cliff J., Haque R.M. & Bradbury H.J. (2005). Processing of cassava roots to remove cyanogens. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18 : 451-460.

- Carlen C., Gilli C., Poffet J. & Wegmüller P.H. (2017). Fertilisation des plantes ornementales et des arbustes. *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6): 1-12.
- Capo-Chichi R., Agassounon D.T.M., Adoukonou-Sagbadja H., Anago, D.G., Ayi-Fanou L., Karou S.D., Ahanhanzo C. & De Souza C. (2019). Evolution du pH et des microflores fermentaires de l'agbelima produit à Pahou, au Bénin. *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, 15(2) : 1-11.
- Carton S. & Bulcke Q. (2021). L'utilisation des digestats en agriculture-Les bonnes pratiques d'utilisation. Guide ENGIE-AgroParisTech, France, 25 p.
- Celerier I. (2012). Assainissement, énergie et coopération : l'option biogaz. Synthèse. Agence Régionale de l'environnement et des nouvelles énergies, Paris (France), 7 p.
- Cereda M.P. & Mattos M.C.Y. (1996). Linamarin, the toxic compound of cassava. *Journal of Venomous Animals and Toxins*, 2(1) : 06-12.
- Chaouali N. (2013). Intoxication par les plantes cyanogènes. Thèse de Doctorat en pharmacie, Université de Monastir (Tunisie), 117 p.
- Christopher S.F. & Lal R. (2007). Nitrogen Management Affects Carbon Sequestration in North American Cropland Soils. *Critical Reviews and Plant Sciences*, 26 : 45-64.
- Cliff J., Muquingue H., Nhassico D., Nzwalo H. & Bradbury J.H. (2011). Konzo and continuing cyanide intoxication from cassava in Mozambique, *Food and Chemical Toxicology*, 49(3) : 631-635.
- CODINORM. (2018). Attiéké-spécifications. NI484 Côte d'Ivoire, 10 p.
- Colin X., Farinet J.L., Rojas O. & Alazard D. (2007). Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. *Bioresource Technology*, 98: 1602-1607.
- Cooke D.R. (1982). Les incidences du traitement du manioc sur le cyanure résiduel. *Compte rendu du colloque sur la toxicité du manioc et la thyroïde: recherches et de questions de santé publique*, 31 mai - 02 Juin 1982, Ottawa, Canada, pp 151-156.
- Coulibaly M., Yoboue B.A., Soro D. & Assidjo N.E. (2023). Assessment of Heavy Metals Content in Fresh and Dried Pepper Grown in Côte d'Ivoire. *IOSR Journal of Environmental Science Toxicology and Food Technology*, 17(7).

- Couturier C. & Galtier L. (2004). Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micro- polluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques. Programme ADEME. Santé- Déchets, Solagro, Toulouse, France, 98 p.
- Cresson R. (2006). Etude du démarrage de procédés intensifs de méthanisation Impact des conditions hydrodynamiques et de la stratégie de montée en charge sur la formation et l'activité du biofilm. PhD, Université de Montpellier II (France), 272 p.
- Cumbana A., Mirione E., Cliff J. & Bradbury J.H. (2007). Reduction of cyanide content of cassava flour in Mozambique by the wetting method. *Food Chemistry*, 101 : 894-897.
- Cuny A. (2015). Etude de la dynamique de bactéries pathogènes lors du stockage de produits résiduels organiques issus de la méthanisation : influence de déterminants biotiques (activité microbienne) et de la biodisponibilité de la matière organique. Master BioMANE, INRA, Narbonne (France), 55 p.
- Diancoumba D. (2008). Diagnostic actualisé de la filière manioc pour une analyse de la chaîne de valeur (CVA) attiéké, 25 p.
- Dan-Badjo T.A., Tidjani A.D., Idder T., Guero Y., Lamso D.N., Matsallabi A., Ambouta K.J.M., Feidt C., Sterckeman T. & Echevarria G. (2014). Diagnostic de la contamination des eaux par les éléments traces métalliques dans la zone aurifère de Komabangou-Tillabéri, Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(6): 2849-2857.
- Dauguet S., Denaix L., Nguyen C., Royer E., Levasseur P., Potin-Gautier M., Lespes G., Parat C., Héroult J., Coudure R., Chéry P., Devert M., Robert N. & Pouech P. (2011). Mesure des flux d'éléments traces (Pb, Cd, As, Cu, Zn) dans les sols, végétaux, porcs et lisiers des exploitations porcines du Sud-Ouest. *Innovations Agronomiques*, 17 :175-190.
- Davidson E.A. & Kanter D. (2014). Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environmental Research Letters*, 9 : 105012.
- De La Farge B. (1995). Le biogaz, procédés de fermentation méthanique. Edition *Masson*, Collection Ingénierie de l'environnement, Paris (France), 233 p.
- Demuyneck M., Nyns E.J. & Palz W. (1984). Biogas Plants in Europe: A Practical Handbook. Springer Netherlands, 361 p.

- Diallo Y., Gueye M.T., Sakho M., Darboux G.P., Kane A., Barthelemy J-P. & Lognay G. (2013). Importance nutritionnelle du manioc et perspectives pour l'alimentation de base au Sénégal (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 17(4): 634-643.
- Djeni N.T., N'Guessan K.F., Toka D.M., Kouame K.A. & Dje K.M. (2011). Quality of attiéké (a fermented cassava product) from the three main processing zones in Côte d'Ivoire. Department of Food Sciences and Technology, University of Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire. *Food Research International*, 44 : 410-416.
- Djoko E., Ngantchouko B., Mezazem T.U. & Koffi A. (2021). L'amidon de manioc dans la formulation des comprimés. *Journal of Pharmacy*, 4(11) : 40-54.
- Djomdi D.R., Ejoh R., Ndjouenkeu R. & Michaud P. (2020). Application of peleg model on hydrothermal treatment of tiger nut tubers (*Cyperus esculentus*) and effect of dehulling efficiency on microbial load. *Journal of Food Science and Nutrition*, 6(4): 070.
- Djoulde D.R. (2005). Mise au point d'un ferment mixte destiné à la bioconversion des tubercules de manioc cyanogène. Thèse de Doctorat, Université de Ngaoundéré, Ngaoundéré (Cameroun), 220 p.
- Dossou D., Bokossa K.H.J., Adanloknonon S.A.E., Zounon Y., Adanloknonon I.M.S., Johnson C.R., Fiogbe D.E. & Edorth P. (2022). Evaluation de la contamination métallique des sédiments et des crabes (*Callinectes amnicola*) du lac Ahémé au sud Bénin. *International Journal of Biological and Cheminical Sciences*, 16(5) : 2424-2435.
- Doublet S., Leclerc B., Couturier C. & Berger S. (2004). La qualité agronomique des digestats. Rapport final SOLAGRO. Etude réalisée pour l'ADEME : C/568 - N°2-12/04, 180 p.
- Drake M.A. (2009). Pratiques sensorielles modernes. In : *L'évaluation sensorielle des produits laitiers*. Springer Science & Business Media, New York (États-Unis) : 505-530.
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. & Smith F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3): 350-356.
- Edmeades D.C. (2003). The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 66 : 165-180.
- EDORA/VALBIOM. (2012). Comprendre la bio méthanisation. Document FAQ rédigé par EDORA dans le cadre de la plateforme biogaz, en collaboration avec Valbiom.

- EDORA: Fédération des énergies renouvelables et Valbiom : Valorisation de la biomasse. Union Européenne, 19 p. <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/files/2013/10/FAQ-biogaz-edora-valbiom.pdf>
- Essers A.J., Alsen P. & Rosling H. (1992). Insufficient processing of cassava induced acute intoxications and the paralytic disease Konzo in a rural area of Mozambique. *Ecology and Food Nutrition*, 27 : 17-27.
- Estevez B. (2006). L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité, une préoccupation en agriculture biologique? 25 p. <https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/Elements%20mineurs%20FINAL2.pdf>
- Etminan M., Myhre G., Highwood E.J. & Shine K.P. (2016). Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters* 43 : 12,614-12,623.
- Falade K.O. & Akingbala J.O. (2010). Utilization of cassava for food. *Food Reviews International*, 27(1) : 51-83.
- FAO. (1956). Acide cyanhydrique. Dosage utilisant la méthode alcaline de titrage. *In* : Traitement du manioc, FAO : 84-85.
- FAO/OMS. (2015). Norme générale pour les contaminants et les toxines présents dans les produits de consommation humaine et animale, CODEX STAN, 64 p.
- FAOSTAT (2022). FAO Statistical databases. Italie, Rome, Consulté le 23 Juin 2024.
- Fares R. & Sédaira L. (2021). Stress abiotique sur *Atriplex halimus* L : Effet des métaux lourds et caractérisation des biomarqueurs. Mémoire Master, Ecophysiologie végétale, Université Larbi Tébessi-Tébessa, Algérie, 119 p.
- Farinet J.L. (2008). Techniques de méthanisation en régions chaudes. Résumé de cours – Octobre 2008, 12 p. https://agritrop.cirad.fr/548746/1/document_548746.pdf
- Favier J.C. (1977). Valeur alimentaire de deux aliments de base africains. *In* : *Le manioc et le sorgho*. ORSTOM, Paris (France), 127 p.
- Feinberg M. (1996). La validation des méthodes d'analyse. Une approche chimiométrique de l'assurance qualité au laboratoire. Edition MASSON, Paris (France), 397 p.

- Fertial. (2017). Manuel d'utilisation des engrais. Grandes cultures, arboricultures et cultures maraichères et industrielles, 100 p.
- Fokunang C.N., Tomkins P.T., Dixon, Alfred G.O., Tembe-Fokunang E.A., Salwa B. Nukenine E.N. & Horan I. (2001). Cyanogenic potential in food crops and its implication in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) production. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 4(7) : 926-930.
- Fortin J., Desmarais G., Assovié O. & Diallo M. (1998). L'attiéké, couscous de la Côte d'Ivoire. *Le Monde alimentaire*, 2 : 22-24.
- Franconi A., Cordeau E., Poitevin J., Camard J-P. & Faytre L. (2001). La pollution des sols : impact sur l'environnement et la santé. Note rapide sur l'environnement et la santé, 286(1): 1-6.
- Friedman P.A. (1980). Common poisons. In: *Harrison's principles of internal medicine.*: McGraw-Hill International Student Edition, London (Royaume-Uni) : 953-965.
- Garonne. (2021). Valorisation agronomique du digestat : étude préalable à l'épandage. GARONNE/BIOGAZ, 105 p.
- Girault R. (2011). Etude des cinétiques de dégradation anaérobie et des interactions entre substrats organiques : impact sur les filières de co-digestion. Mémoire de thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Rennes (France), 288 p.
- Gnagne G-B.A.A., Koffi E.K., Assanvo J.B. & Soro S. (2016). Influences de la congélation et du séchage de l'attiéké sur ses caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(2) : 808-819.
- Gogbeu J.S., Dogbo D.O., Gonnety T.J., N'zué B., Zohouri G.P. & Boka A. (2011). Study of some characteristics of soluble polyphenol oxidases from six cultivars callus off cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Animals and Plants Sciences*, 9: 1169-1179.
- Goupy J. (2006). Les plans d'expériences. *Revue MODULAD*, 34 : 74-116.
- Goupy J. & Creighton L. (2006). Introduction aux plans d'expériences. 3^e Edition L'Usine Nouvelle DUNOD, 336 p.
- Guira F. (2013). Evaluation des valeurs nutritive et sanitaire d'attiéké issu de différentes pâtes de manioc importées ou produites localement à partir de différents ferments. Mémoire

de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 78 p.

- Hanaki K., Matsuo T. & Nagase M. (1981). Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. *Biotechnology and Bioengineering*, 23(7):1591–1610.
- Hansen K.H., Angelidaki I. & Ahring B.K. (1998). Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. *Water Research*, 32(1) :5–12.
- Hansen M.N. & Nyord T. (2005). Effects of separation and anaerobic digestion of slurry on odour and ammonia emission during subsequent storage and landspreading. *In*: NJF Report, MANURE, an agronomic and environmental challenge. Proceeding of NJF seminar number 372, edited by Stenberg M., Nilsson H., Bryjolfsson R., Kapuinen P., Morken J. & Birkmose T. Nordic association of agricultural scientists, Skurup, Sweden : 53-57.
- Harper S.R. & Pholand F.G. (1986). Recent developments in hydrogen management during anaerobic biological wastewater treatment. *Biotechnology Bioengineering*, 28(4) : 585-602.
- Hattori S. (2008). Syntrophic acetate-oxidizing microbes in methanogenic environments. *Microbes and Environments*, 23(2):118-27.
- Hejcman M., Češková M., Schellberg J. & Pätzold S. (2010). The rengen grassland experiment: effect of soil chemical properties on biomass production, plant species composition and species richness. *Folia Geobotanica*, 45 : 125-142.
- Hongbété F., Mestres C., Akissoé N. & Nago M.C. (2009). Effect of processing conditions on cyanide content and colour of cassava flours from West Africa. *African Journal of Food Science*, 33(1) : 001-006.
- Ihedioha J.I. (2002). The clinicopathologic significance of enriching grated cassava mash with red palm oil in the production of gari. *Plant Foods for Human Nutrition*, 57(3-4): 295-305.
- Imakumbili M.L.E., Semu E., Semoka J.M.R. & Abass A. (2020). Plant tissue analysis as a tool for predicting fertiliser needs for low cyanogenic glucoside levels in cassava roots : An assessment of its possible use. *Plos One*, 15(2) : 1-22.

- Indianombomazava R. (2010). Le Biogaz : énergie et possibilité de substitution aux bois de chauffe et charbons de bois. Mémoire de recherche en master 2, Faculté des Sciences, Université de Mahajanga, Madagascar, 56 p.
- IITA. (1990). Cassava in tropical Africa. A reference manual. Ibadan (Nigeria), 176 p.
- IITA. (1993). Archival Report (1989-1993). Part 1. Cassava breeding, cytogenetics and histology. Vol. 2. Germplasm enhancement. Crop Improvement Division. TRIP (Tuber Root Improvement Program). Ibadan (Nigeria), 157 p.
- IRE. (2007). Pollution organique. Eau. *Edition DRIRE/IRE*, Nord-Pas-de Calais (France):190-195.
- Jacquin O. (2023). Méthanisation et risques de pollutions liées à l'épandage de digestats. Question écrite n°06508 - 16e législature. *Journal Officiel du Senat* du 27/04/2023, 2766 p.
- James B., Okechukwu R., Abass A., Fannah S., Maziya-Dixon B., Sanni L., Osei-Sarfoh A., Fomba S. & Lukombo S. (2013). Production du Gari à Partir de Manioc : Guide Illustré à l'Intention des Transformateurs de Manioc à Petite Echelle. Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) : Ibadan (Nigeria), 32 p.
- Janos V. (2000). Plant cyanogenic glycosides. *Toxicon*, 38 : 11-36.
- Jordan-Meille L., Morel C., Salducci X. & Michaud J. (2017). Valeur agronomique (C, N, P) de digestats de méthanisation d'origine agricole et agro-alimentaire de Dordogne. 13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse Comifer Gemas. 8 & 9 novembre 2017 Nantes (France), 11 p. <https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2023/03/RENC2017-Comifer-Gemas-ARTICLE-JORDAN-MEILLE.pdf>
- Kacou A. C. (2000). Optimisation des conditions d'application d'une méthode de conservation longue durée de la pâte de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) pour améliorer la qualité alimentaire de l'attiéké et du placali. Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 250 p.
- Kalloum S., Bouabdessalem H., Touzi A., Iddou A. & Ouali M.S. (2011). Biogas production from the sludge of the municipal wastewater treatment plant of Adrar city (southwest of Algeria). *Biomass and Bioenergy*, 35: 2554-2560.

- Kalloum S., Khelafi M., Djaafri M., Tahri A. & Touzi A. (2007). Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers. *Revue des Energies Renouvelables*, 10(4): 539-543.
- Kalonda D.M., Kabamba T.A., Kodondi K.K.F., Kasongo B.C., Kisunka B.Y., Musola C.H. & Kahambwe J-L. (2015). Profil des métaux lourds contenus dans les plantes vivrières consommées couramment dans quelques zones minières de la province du Katanga. *Journal of Applied Biosciences*, 96: 9049-9054.
- Kambiré S.J. (2022). Etude de l'impact de la fertilisation minérale sur la composition chimique et la teneur en tanins condensés de fourrages issus de prairies à haute valeur biologique. Mémoire de Master, Master en bio ingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée, 58 p.
- Kamilou O.S., Hodabalo D.S., Kissao G., Komlanand M.A. & Essô J.B. (2014). Évaluation et risques sanitaires de la bioaccumulation de métaux lourds chez des espèces halieutiques du système lagunaire togolais. *Vertigo- la Revue électronique en Sciences de l'Environnement*, 18 p.
- Kasongo L.M.E., Mwamba M.T., Tshipoya M.P., Mukalay M.J., Useni S.Y., Mazinga K.M. & Nyembo K.L. (2013). Réponse de la culture de soja (*Glycine max* L. (Merril) à l'apport des biomasses vertes de *Tithonia diversifolia* (Hemsley) A. Gray comme fumure organique sur un Ferralsol à Lubumbashi, R.D. Congo. *Journal of Applied Biosciences*, 63 : 4727-4735.
- Kasereka M.S., Kambale M.M., Mbusa K.Y., Lwanzo K.N., Kakule V.J.E., Muhindo S.W. & Mutiviti P.G. (2024) : Matière sèche, HCN et NPK des tubercules de manioc soumis à différentes doses du NPK. *Revue interdisciplinaire du Graben (PIRIG)*, 27 : 35-60.
- Khater E-S.G. (2015). Some physical and chemical properties of compost. *International Journal of Waste Resources*, 5 : 72-79.
- Kidd J., Manning P., Simkin J., Peacock S. & Stockdale E. (2017). Impacts of 120 years of fertilizer addition on a temperate grassland ecosystem. *PLOS One*, 12 : 1-26.
- Kimario V.M., Massawe G.A., Olasupo N.A. & Holzapfel W.H. (2000). The use of a starter culture in the fermentation of cassava for the production of "kivunde" a traditional Tanzanian food product. *International Journal of Food Microbiology*, 56 : 179-190.

- Kobawila S.C., Louembé D., Kéléké S., Hounhouigan J. & Gamba C. (2005) Réduction de la teneur en cyanure lors de la fermentation des racines et des feuilles de manioc pour produire du bikedi et du ntoba mbodi, deux produits alimentaires du Congo. *Revue africaine de biotechnologie*, 4 : 689-696.
- Koko A.C. (2012). Influence de la variété et de la région de culture sur les caractéristiques physicochimiques des racines de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) et des farines fermentées dérivées en vue de la valorisation en panification et dans la reconstitution du placali. Thèse unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 183 p.
- Koko A.C., Kouamé K.B., Anvoh Y.B., Amani N.G. & Assidjo N.E. (2014). Comparative study on physicochemical characteristics of cassava roots from three local cultivars in Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 10(33) : 418-432.
- Koko A.C., Kouame K.B., Diomande M., N'goran M.F., Akmel D.C. & Assidjo N.E. (2018). Quantitative Assessment of the Risk Associated to *Bacillus cereus* Group for the Attieke Consumer in Daloa City (Côte d'Ivoire). *Asian Food Science Journal*, 1(1) : 1-13.
- Kolawole O.K., Awodun M.A. & Ojeniyi S.O. (2014). Soil fertility improvement by *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A Gray and its effect on cassava performance and yield. *International Journal of Engineering and Sciences*, 3(8): 36-43.
- Kosh-Komba E., Zaman M. & De Mon-Zoni G.J.L. (2021). Les bonnes pratiques de productions du manioc en république Centrafricaine. 2e édition, ICRA/AIEA/FAO, 27 p.
- Kouamé K.A. (2013). Identification des dangers et des points critiques de contrôle pour la mise en place d'un système HACCP pour la production de l'attiéké en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et technologies des Aliments, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 191 p.
- Kouadio K.H., Koné W.A., Touré T.G., Abibi D.A.H., Konan L.N., Assi A.J., N'guessan A.J.D., Yapo R.G., Dibi E.B. & Massé D. (2023). Amélioration du rendement du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) par la jachère mixte *Chromolaena odorata-Cajanus cajan* au Centre de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 35(1) : 63-74.

- Kpata N.E. (2014). Valorisation des effluents issus de la production d'attiéke par digestion anaérobie avec l'urine humaine comme co-substrat. Thèse de Doctorat, Université Nangui ABROGOUA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 181 p.
- Kpata-Konan N.E., Konan K.F., Kouamé K.M., Kouamé Y.F., Gnagne T. & Tano K. (2011). Optimisation de la biométhanisation des effluents de manioc issus de la filière de fabrication de l'*attiéké* (semoule de manioc). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5 : 2330-2342.
- Kpata-Konan N.E., Kouamé Y.F., Kouamé K.M. & Konan K.F. (2019). Characterization of Digestats from Anaerobic Co-Digestion of Manioc Effluent, Human Urine and Co Dung. *Journal of Water Resource and Protection*, 11(6): 777-788.
- Krabi E.R., Assamoi A.A., Ehon A.F., Bréhima D., Niamké L.S. & Thonart P. (2015). Production d'attiéké (couscous à base de manioc fermenté) dans la ville d'Abidjan. *European Scientific Journal*, 11(15) : 277-292.
- Kratzeisen M., Starcevic N., Martinov M., Maurer C. & Müller J. (2010). Applicability of biogas digestate as solid fuel. *Fuel*, 89 : 2544-2548.
- Kunwar P.S., Dinesh M., Sarita S. & Dalwani R. (2004). Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural and environmental quality in the wastewater disposal area. *Chemosphere*, 55: 227-255.
- Ladeira T., Souza H. & Pena R. (2013). Characterization of the roots and starches of three cassava cultivars. *International Journal of Agricultural Science Research*, 2(1) : 012-020.
- Labrani M. (2021). Biochimie végétale/chap1. In : *Les glucides végétaux*. Catalogue des cours en ligne UFMCI, 30 p.
- Laurent C., Bravin M.N., Crouzet O., Pelosi C., Tillard E., Lecomte P. & Lamy I. (2020). Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination. *Science of the Total Environment*, 709 : 1-38.
- Lawless H.T. & Heymann H. (1998). Sensory Evaluation of Food : Principles and Practices. *Springer Science+Business Media*, New York (USA), 827 p.
- Lawless H.T. & Heymann H. (2010). Sensory Evaluation of Food : Principles and Practices 2^{ème} édition. *Springer*, New York (USA), 596 p.

- Le Hyaric R., Canler J.P., Barillon B., Naquin P. & Gourdon R. (2010). Pilot-scale anaerobic digestion of screenings from wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, 101(23): 9006-9011.
- Li K., Liu R. & Sun C. (2015). Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations. *Bioresource Technology*, 198: 133-140.
- Li Q.S., Chen Y., Fu H.B., Cui Z.H., Shi L., Wang L. & Liu Z.F. (2012). Health risk of heavy metals in food crops grown on reclaimed tidal flat soil in the Pearl River Estuary, China. *Journal of Hazardous Materials*, 227-228(7) : 148-54.
- Lyberatos G. & Skiadas I.V. (1999). Modelling of anaerobic digestion. *Global NEST Journal*, 1(2) : 63-76.
- M'Sadak Y., Zoghlami R. & Baraket S. (2012). Characterizations energy and environmental of the biomethanisation pilot applied on the animal droppings. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 4(2): 210-222.
- Manoely H. (2010). Etude de faisabilité technico-économique de production de biogaz et de fertilisants organiques par méthanisation de fientes de cailles. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome, Département Industries Agricoles et Alimentaires, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo (Madagascar), 66 p.
- Marache L.E. (2001). Méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur le devenir pathogène. Thèse de Doctorat, Ecole nationale vétérinaire de Toulouse (France), 183 p.
- Mata-Alvarez J. (2003). Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Éditions IWA, Volume 4, 338 p.
- Mata-Alvarez J., Dosta J., Romero-Güiza M.S., Fonoll X., Peces M. & Astals S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36 : 412-427.
- Marinova D., Ribarova F. & Atanassova M. (2005). Total phenolics and total flavonoids in bulgarian fruits and vegetables. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 40(3) : 255-260.

- McMahon J.M., White W.L.B. & Sayre R.T. (1995). Cyanogenesis in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Experimental Botany*, 46 : 731-141.
- Memento de l'agronome (2023). Memento de l'agronome. CIRAD-GRET, Ministère des Affaires Etrangères, Editions *QUAE*, Paris (France), 1698 p.
- Mengel K. & Kirkby E.A. (2001). Principles of plant nutrition. Dordrecht : *Kluwer Academic Publishers*. Articles from *Annals of Botany* are provided here courtesy of Oxford University Press, 2004, 93 : 479- 480.
- Meres M. (2005). Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa composition et de son exploitation dans des centres de stockage des déchets ménagers. Thèse pour obtenir le grade de Docteur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (France), Université Jagiellone de Cracovie (Pologne), 140 p.
- Mguis K. & Ksontini M. (2005). Etude du système racinaire de jeunes plants de *Quercus suber* L. (Chêne liège) dans des conditions semi-contrôlées. *Les Annales de l'INRGREF*, 7 : 139 -152.
- Mohamed A.R. & Ahmed K.S. (2006). Market basket survey for some heavy metals in Egyptian fruits and vegetables. *Food and Chemical Toxicology*, 44 : 1273-1278.
- Moletta R. (2004). La méthanisation deuxième édition. *Lavoisier*. Edition *TEC et DOC*, Paris (France), 533 p.
- Moletta R. (2008). La méthanisation. Édité par *Lavoisier*. *TEC et DOC*, Paris (France), 532 p.
- Möller K. & Müller T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3): 242-257.
- Monlau F., Sambusiti C., Ficara E., Aboulkas A., Barakat A. & Carrère H. (2015). New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *Energy & Environmental Science*, 15(8): 2600-2621.
- Morot-Gaudry J.F., Roger Prat F.M., Maurel C. & Sentenac H. (2009). *Biologie Végétale : Nutrition et métabolisme*. Edition *Dunod*, Paris (France), 216 p.
- Mosquera-Losada M.R., Munoz-Ferreiro N. & Rigueiro-Rodriguez A. (2010). Agronomic characterisation of different types of sexage slug : Policy implications. *Waste Manage*, 30(3) : 492-503.

- N'diaye A., Ndiaye O., Bamba B., Guèye M. & Sawané O. (2019). Effets de la fertilisation organo-minérale sur la croissance et le rendement du « mil sanio » (*Pennisetum glaucum* L. R. Br) en Haute Casamance (Sénégal). *European Scientific Journal*, 15(33) : 155-170.
- N'zué B., Zohouri G.P., Yapi-Gnahoré V. & Djédji C. (2005). Bien cultiver le manioc en Côte d'Ivoire. Fiche technique, CNRA-CTA, Abidjan, 4 p. https://agroivoire.files.wordpress.com/2014/10/cultiver_manioc.pdf
- Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K. & Dalai A.K. (2010). Production of first and second-generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 578–597.
- Nevry K.R., Koussemon M. & Aboua F. (2007). Chemical and organoleptic properties of *attoukpou* made from two cassava (*Manihot esculenta* Crantz) varieties, Bonoua and IAC. *Journal of Food Technology*, 5(4) : 300-304.
- NF EN 25663 (1994). Qualité de l'eau - Dosage de l'azote Kjeldahl - Méthode après minéralisation au sélénium. Association Française de Normalisation, France, 4 p.
- NF EN ISO 5815-1 (2019). Qualité de l'eau - Détermination de la demande biochimique en oxygène après n jours (DBOn) - Partie 1 : méthode par dilution et ensemencement avec apport d'allylthiourée. Association Française de Normalisation, France, 32 p.
- NF EN ISO 7218 (2024). Microbiologie de la chaîne alimentaire - Exigences générales et recommandations pour les examens microbiologiques, France, 80 p.
- NF T90-101 (2021). Qualité de l'eau - Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO). Association Française de Normalisation, France, 11 p.
- NF T90-102 (1997). Analyse de l'eau - Lignes directrices pour la détermination du carbone organique total (COT) et du carbone organique dissous (COD). Association Française de Normalisation, France, 15 p.
- NF U 44-051 (2006). Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage, France, 13 p.
- Nitidae. (2020). Valorisation du digestat liquide issu de la biodigestion de jus de manioc, 15 p. https://www.nitidae.org/files/6ff5049c/rapport_de_valorisation_du_digestat_liquide_issu_de_la_biodigestion_de_jus_de_manioc.pdf

- Nouar M., Decreux Y. & Marty O. (2013). Evaluation du potentiel à l'exportation du manioc en Côte d'Ivoire. *PACIR, UE*, 53 p.
- Nzigamasabo A. & Zhou H.M. (2006). Traditional cassava foods in Burundi. *Food Reviews International*, 22(1) : 1-27.
- Ogbonna D., Isirimah N. & Princewill E. (2012). Effect of organic waste compost and microbial activity on the growth of maize in the utisoils in Port Harcourt, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 11(62) : 12546-12554.
- Ognalaga M., M'Akoué D.M., Medza Mve D.S. & Ovono P.O. (2017). Effet de la bouse de vaches, du NPK 15 15 15 et de l'urée à 46% sur la croissance et la production du manioc (*Manihot esculenta* Crantz var. 0018) au Sud-Est du Gabon (Franceville), *Journal of Animal & Plant Sciences*, 31(3) : 5063-5073.
- Omondi J.O. & Yermiyahu U. (2021). Improvement in cassava yield per area by fertilizer application. In *Cassava : Biology, Production and Use. Frediansyah*, 180 p.
- Ouegnin E.A. (1988). Contribution à l'étude de l'acide cyanhydrique dans un produit de transformation du manioc : « l'Attiéké ». Thèse de Doctorat en pharmacie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 113 p.
- Parawira W., Murto M., Zvauya R. & Mattiasson B. (2006). Comparative Performance of a UASB Reactor and an Anaerobic Packed-Bed Reactor when treating potato waste leachate. *Renewable Energy*, 31(6): 893 - 903.
- Parent L.O. & Rivest R. (2003). Les éléments nutritifs Dans le Guide de fertilisation. 1ère édition, *CRAAQ*, Québec, Canada, 294 p.
- Pavlostathis S.G. & Giraldo-Gomez E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment. *Water Science and Technology*, 24(8) : 35-59.
- Peprah B.B., Parkes Y.E., Harrison A.E., Biljon V.A., Steiner-Asiedu M. & Labuschagne T.M. (2020). Proximate composition, cyanide content, and carotenoid retention after boiling of provitamin rich cassava grown in Ghana. *Foods*, 9 (12) : 1-13.
- Pereira B. & Sonnet P. (2007). La contamination diffuse des sols par les éléments traces métalliques en Région wallonne. Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallonne, 27 p.
<https://id.scribd.com/document/464391187/contamination-diffuse-du-sol-par-les-elements-traces-metalliques-pdf>

- Petitjean C., Le Gall C., Pontet C., Fujisaki K., Garri B., Horth J-C., Hénault C. & Perrin A-S. (2019). Soil N₂O, CH₄, and CO₂ fluxes in forest, grassland, and tillage/No-tillage croplands in french Guiana (Amazonia). *Soil Systems*, 3 : 29.
- Pillet M. (2011). Les plans d'expériences par la méthode *TAGUCHI*. Editions 2011, Chambéry, France, 254 p.
- Poeplau C., Zopf D., Greiner B., Geerts R., Korvaar H., Thumm U., Don A., Heidkamp A. & Flessa H. (2018). Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 265 : 144-155.
- Pouech P. (2008). Principales caractéristiques des digestats. In : *Journée technique nationale du 7 octobre 2008 organisée par l'ADEME : « Réussir un projet de méthanisation associant des déchets ménagers agricoles et industriels. Les points clés. »*, Paris, France, 07/10/2008, 6 p.
- Raffaillac J.P. (1997). Le manioc : quelles priorités de recherche pour améliorer la production en relation avec la commercialisation. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, 43 : 7-19.
- Raharijaona O. (2006). Contribution à l'étude technico-économique comparative de deux modèles de biodigesteur : Cloche flottante et plug-flow- cas de fermes de vaches laitières. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies, Département génie chimique, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo (Madagascar), 94 p.
- Rambaut E.L-A. (2022). Impact agronomique et environnemental d'une fertilisation long terme - mixte minérale et organique - sous prairies tropicales le long d'un gradient altitudinal. Mémoire de thèse pour obtenir le grade de docteur de l'institut agro Montpellier et de l'Université de Montpellier, Unité de recherche - Système d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET) Cirad (France), 156 p.
- Randriamaitso T. (2006). Adaptation du groupe électrogène à essence à l'utilisation du biogaz comme carburant. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etude Approfondies de Physique, Option Energétique, Département de physique, Faculté des sciences, Université d'Antananarivo (Madagascar), 61 p.

- Razanaparany H. (2005). Modélisation d'une digestion anaérobie du lisier de porc. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies, Département de physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo (Madagascar), 61 p.
- Rehl T. & Müller J. (2011). Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 56: 92-104.
- Reibel A., Geres & Leclerc B. 2018. Valorisation agricole des digestats : Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement. Revue de littérature. La méthanisation en Provence – Alpes – Côte d'azur, 63 p. https://www.geres.eu/wp-content/uploads/2019/10/ARE1805.201.ENV_VALOMOI.Etude_Digestats_VF.pdf
- Rodriguez H. & Fraga R. (1999). Bactéries solubilisant le phosphate et leur rôle dans la promotion de la croissance des plantes. *Biotechnology Advances*, 17(4-5) : 319-339.
- Rogers J.D. & Appan S.G. (1973). Flora neotropica monography N°13. *Manihot-manihotoides* (Euphorbiacées). *Hafner press*, New-york (USA), 272 p.
- Sabonnadière J-C. (2007). Nouvelles technologies de l'énergie 3 géothermie et énergies de la biomasse. *Hermes Science*, Paris, 262 p.
- Saidi A. & Abada B. (2007). La biométhanisation : une solution pour un développement durable. *Revue des Energies Renouvelables*, CER'07 Oujda (Algérie): 31-35. https://www.cder.dz/download/cer07_7.pdf
- Saint-Denis M. (2009). Synthèse des connaissances sur les impacts environnementaux et les risques sanitaires de l'incinération, de la méthanisation et des centres de stockage. Rapport produit pour Sycotom, 50 p. https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-traitement-dechets-ivry/IMGS/DOSSIER_MO/BIO_TOX_SYNTHESE_DES_CONNAISSAN.PDF
- Santisopasri V., Kurotjanawong K., Chotineeranat S., Piyachomkwan K., Sriroth K. & Oates C.G. (2001). Impact of water stress on yield and quality of cassava starch. *Industrial Crops and Products*, 13: 115-129.
- Saou A., Snoussi S-A. & Chaouia C. (2017). Effet de la fertigation sur le rendement et sur la qualité des fruits du concombre (*Cucumis sativus*), variété super marketer cultivé sous serre. *Revue Agrobiologia*, 7(1) : 233-241.
- Schafer J.L. (1999). Amélioration du système de culture du Macabo, *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott, en pays Bamiléké (Ouest-Cameroun). *Cahiers Agricultures*, 8(1) : 9-20.

- Sentürk E., Ince M & Onkal-Engin G. (2010). Treatment efficiency and VFA composition of a thermophilic anaerobic contact reactor treating food industry wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 176: 843-848.
- Sharpley A. & Moyer B. (2000). Phosphorus Forms in Manure and Compost and Their Release during Simulated Rainfall. *Journal of Environmental Quality*, 29 : 2053-2053.
- Shibamoto T. & Bjeldanes L.F. (1993). Introduction to food toxicology. Academic Press, New York (USA), 146 p.
- Shiralipour A. & Smith P.H. (1984). Conversion de la biomasse en gaz méthane. *Biomasse* 6: 85-92
- Shokalu A.O., Ojo A.O., Adewoyin D.T. & Azeez J.A. (2010). Évaluation de *Tithonia diversifolia* pour l'amélioration des sols dans la production de célosie (*Celosia argentea*). *Revue Electronique de Chimie Environnementale, Agricole et Alimentaire*, 9(5) : 951-957.
- Siegert I. & Banks C. (2005). The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. *Process Biochemistry*, 40(11):3412-3418.
- Silvestre P. & Arraudeau M. (1983). Le manioc. Agence de Coopération Culturelle et Technique, collection : Techniques agricoles et productions tropicale. *Maisonneuve et Larose*, Paris, France, 262 p.
- Siriwongrungson V., Zeng R.J. & Angelidaki I. (2007). Homoacetogenesis as the alternative pathway for H₂ sink during thermophilic anaerobic degradation of butyrate under suppressed methanogenesis. *Water Research*, 41(18): 4204-4210.
- Smith R., Jouhet J., Gandini C., Nekrasov V., Marechal E., Napier J.A. & Sayanova O. (2021). Plastidial acyl carrier protein Δ^9 - desaturase modulates eicosapentaenoic acid biosynthesis and triacylglycerol accumulation in *Phaeodactylum tricoratum*. *The Plant Journal*, 106 :1247-1259.
- SOLAGRO-IRSTEA. (2015). Etat de l'art des digestats et de leurs procédés de post-traitement. Rapport final février 2012- juin 2015, 76 p. https://methasynergie.fr/wp-content/uploads/2020/03/Etat-de-lart-des-digestats-et-post-traitements_2015.pdf

- Sotomey M., Atègbo E-A., Mitchképé E., Gutierrez M-L. & Muchnik J. (2001). Innovation et diffusion des produits alimentaires en Afrique : l'attiéké au Bénin. CIRAD, Paris (France), 98 p.
- Soussana J.F., Tallec T. & Blanfort V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4 : 334-350.
- Sperling V.M. & Chernicharo C.A.D.L. (2005). Traitement biologique des eaux usées dans les régions à climat chaud. IWA Publishing, Londres (Royaume-Uni), 856 p.
- Stams A.J.M., De Bok F.A.M., Plugge C.M., Van Eekert M.H.A., Dolfing J. & Schraa G. (2006). Exocellular electron transfer in anaerobic microbial communities. *Environmental Microbiology*, 8(3): 371-382.
- Steiner C., Teixeira W.G., Lehmann J., Nehls T., De Macêdo J.L.V., Blum W.E.H. & Zech W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil*, 291 :275–290.
- Stupak M., Vanderschuren H., Gruissem W. & Zhang P. (2006). Biotechnological approaches to cassava protein improvement. *Trends in Food Science and Technology*, 17 : 634-641.
- Street H.E. & Opik A. (1976). The physiology of flowering: their growth and development. *Edward Arnold*, London (Royaume-Uni), 263 p.
- Sun J.X., Sun X.F., Zhao H. & Sun R.C. (2004). Isolation et caractérisation de la cellulose à partir de la bagasse de canne à sucre. Dégradation et stabilité des polymères. *Elsevier* 84(2) : 331-339.
- Symnaczik S., Mäder P. & Romano I. (2022). Biofertilisants. Fiche technique N°1240, 14 p. DOI: 10.5281/zenodo.7428682
- Taffouo V.D., Tsoata E., Kenne M., Priso J.R., Fonkou T. & Akoa A. (2006). Influence des apports modérés d'engrais sur la valeur nutritionnelle de *Manihot esculenta* Crantz. (Euphorbiaceae). *Cameroon Journal of Experimental Biology*, 02 : 62-69.
- Taiz L. & Zeiger E. (2010). Plant Physiology. 5e édition, *Sinauer Associates*, Sunderland (England), 782 p.

- Tambone F., Genevini P., D'Imporzano G. & Adani F. (2009). Assessing amendment properties of digestat by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresource Technology*, 100(12) : 3140-3142.
- Tampio E., Marttinen S. & Rintala J. (2016). Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestat liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, 125: 22–32.
- Tcha-Thom M. (2019). Recherche d'une filière durable pour la méthanisation des déchets de fruits et d'abattoirs du Togo : Evaluation du potentiel agronomique des digestats sur les sols de la région de la Kara. Mémoire de thèse de Doctorat, Université de Lomé en cotutelle avec l'Université de Limoges, Lomé (Togo), 205 p.
- Teffahi A. & Noun A. (2021). Raisonnement de la fertilisation azotée phospho-potassique (NPK) de la culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.) variété vitron) dans la région de Guelma. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, (Algérie), 87 p.
- Teglia C., Tremier A. & Martel J.L. (2011). Characterization of solid digestates: part 1, review of existing indicators to assess solid digestates agricultural use. *Waste Biomass Valor*, 2: 43–58.
- Testud F. (2004). Engrais minéraux. In : *EMC- Toxicologie-Pathologie*. Elsevier, 1 (1) : 21-28.
- Tran T.S., Giroux P.M., Audesse & Guilbault J. (1995). Importance des oligo-éléments en agriculture : symptômes visuels de carence, analyses des végétaux et des sols. *Agrosol*, 8(1) :12-22.
- Tremier A., Buffet J., Picard S. & Saint-Cast P. (2014). Caractérisation Physico Chimique Des Digestats Bruts Solides Et Liquides Et Stabilité Biologique Résiduelle. DIVA Livrables Tâche 3a. IRESTEA RENNES 17 avenue de Cucillé, ANR, 96 p.
- Trèche S. (1995). Importance du manioc en Alimentation humaine dans différentes régions du monde. In : *Transformation alimentaire du manioc*. AgborEgbe T., Brauman A., Griffon D., Treche S., éd., Editions ORSTOM, Paris (France) : 234-243.
- Tylleskär T., Banea M., Bikangi N., Cooke R.D., Poulter N.H. & Rosling H. (1992). Cyanogènes du manioc et konzo, une maladie des motoneurons supérieurs observée en Afrique. *The Lancet*, 339: 208-211.

- Ubalua A.O. (2007). Cassava wastes: treatment options and value addition alternatives. *African Journal of Biotechnology*, 18(6): 2065-2073.
- Vedrenne F. (2007). Etude des processus de dégradation anaérobie et de production de méthane au cours du stockage des lisiers. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Renne, France, 232 p.
- Verma N.K. (2011). Integrated nutrient management in winter maize (*Zea mays* L.) sown at different dates. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 3(8) : 161 - 167.
- Vernier P., N'Zue B. & Zakhia-Rozis N. (2018). Le manioc, entre culture alimentaire et filière agro-industrielle. Versailles. Edition *Quae-CTA*, 208 p.
- Voko Bi D.R.R., Ahonzo-Niamke L.S. & Zeze A. (2013). Impact des propriétés physicochimiques des sols de culture du manioc sur l'abondance et la diversité des communautés de champignons mycorhiziens à arbuscules dans la zone agroécologique d'Azaguié, Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 25 (3) : 251 – 264.
- White W.L.B., McMahon J.M. & Sayre R.T. (1994). Regulation of cyanogenesis in cassava. *Acta Horticulturae*, 375 : 69-78.
- Wood J.E., Senthilmohan S.T. & Peskin A.V. (2002). Activité antioxydante des extraits végétaux contenant des procyanidines à différents pH. *Food Chemistry*, 77(2) : 155-161.
- Xie X., Machikowa T. & Wonprasaid S. (2020). Fertigation based on a nutrient balance model for cassava production in two different textured soils. *Plant Production Science*, 23: 407-416.
- Yé L., Lompo J.P.D., Sako A. & Nacro B.H. (2020). Evaluation des teneurs en éléments traces métalliques des sols soumis à l'apport des déchets urbains solides. *International Journal of Biological and Cheminical Sciences*, 14(9): 3361-3371.
- Yéboué K.H., Amoikon K.E., Kouamé K.G. & Kati-Coulibaly S. (2017). Valeur nutritive et propriétés organoleptiques de l'attiéké, de l'attoukpou et du placali, trois mets à base de manioc, couramment consommés en Côte d'Ivoire. *Journal des biosciences appliquées*, 113(1): 11184-11191.
- Yenigün O. & Demirel B. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion. *Process Biochemistry*, 48(5) :901-911.

- Zadi M., Turquin L. & Lekadou T.T. (2018). Effets de deux types d'engrais organiques sur la croissance et le développement du cocotier hybride pb 113⁺ en pépinière. *Agronomie Africaine*, 30(3) : 237- 247.
- Zhang Y., Nie L., Sun J., Hong Y., Yan H., LI M., You X., Zhu L. & Fang F. (2020). Impacts of environmental factors on pasting properties of cassava flour mediated by its macronutrients. *Frontiers in Nutrition*, 7 :1-9
- Zouménou M.R.B.V. (1994). Etudes physico-chimique et nutritionnelles de quelques préparations alimentaires à base de manioc (*Manihot esculenta* Crantz). Thèse de Doctorat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan (Côte d'Ivoire), 115 p.
- Zoundjiekpon J. (1986). Etude morphologique et enzymatique de cultivars de *Manihot esculenta* Crantz. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan (Côte d'Ivoire), 120 p.

ANNEXES

Annexes

Annexe 1 : Matériel technique



OXYTOP



ICP-MS de marque Agilent



Tarière manuelle



Pied à coulisse de marque Rohs



Multimètre de marque YK-2001PHA



Balance de marque Ohaus

Annexes



Balance de marque ADAM^R



Mètre ruban



Balance commerciale de marque le Résistant



Etuve de marque Incu-line



COT-mètre de marque Analytik Jena Multi



Fûts de stockage des digestats

Annexes

Annexe 2 : *Attiékés* produits avec des racines traitées au digestat (a) et avec des racines non traitées (b).



a



b

Annexe 3 : Mise en place du digesteur



Identification site



Conception de briquettes



Pose de briquettes et coulage



Fond du digesteur terminé



Montage des murs du digesteur



Dôme en finition

Annexes



Plateforme en finition



Plateforme de production de biogaz et de digestat achevé

Annexes

Annexe 4 : Fiche d'évaluation sensorielle des échantillons d'*attiéké*

I- Caractéristiques des consommateurs

Code consommateur :

Sexe :

Masculin

Féminin

Age :

Moins de 30 ans

30 ans et plus

Fréquence de consommation de l'*attiéké* :

1 fois par mois 1 fois par semaine Plus d'1 fois par semaine Autres (à préciser) -----

II- Appréciation hédonique

Appréciation Hédonique	Echelle de satisfaction en 9 points *								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Globale 1/									
Visuelle 1/									
Odeur 1/									
Goût 1/									
Texture 1/									

1/ Cochez la case en fonction de l'échelle
(*) Echelle discontinue
1 Extrêmement désagréable
2 Très désagréable
3 Désagréable
4 Plutôt désagréable
5 Ni désagréable, ni agréable
6 Plutôt agréable
7 Agréable
8 Très agréable
9 Extrêmement agréable

Code de l'échantillon :

Ordre de présentation :

Date :

PUBLICATIONS

PUBLICATION 1

Optimisation des paramètres d'épandage du digestat, un engrais biologique utilisé dans la culture du manioc par la méthodologie des surfaces de réponse



Optimisation des paramètres d'épandage du digestat, un engrais biologique utilisé dans la culture du manioc par la méthodologie des surfaces de réponse

OSSEPE Yapi Jean Louis Fernandez¹, KOKO Anauma Casimir^{1*}, AKMEL Djedjro Clément²

¹Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Agroforesterie, Laboratoire d'Agrovalorisation (AGROVAL), BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

²Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèses, de l'Environnement et des Énergies Nouvelles (LAPISEN), BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

*Auteur correspondant, contact et Adresse E-mail : +225 0707364095, anaumako@yahoo.fr

Mots clés : Digestat, épandage, manioc, plans d'expériences, rendement.

Keywords: Digestate, spreading, cassava, experimental design, yield

Submitted 03/05/2024, Published online on 05/06/2024 in the [Journal of Animal and Plant Sciences \(J. Anim. Plant Sci.\) ISSN 2071 – 7024](#)

1. RÉSUMÉ

Le digestat est un engrais biologique issu de la méthanisation d'effluents de manioc. Pour son utilisation efficiente dans la culture du manioc, les conditions optimales d'épandage doivent être identifiées. La présente étude a donc pour objectif de déterminer les conditions les meilleures aboutissant au rendement maximal en tubercules frais pour l'utilisation de ce digestat. Pour ce faire, un plan central composite à deux facteurs utilisant la méthodologie des surfaces de réponse a été suivi. Ainsi, 13 essais de culture ont été réalisés en variant la concentration du digestat (X_1) de 25 à 100 % et le volume (X_2) à répandre de 0,5 à 2 L. À l'issue des essais qui ont duré 12 mois, le rendement en racines a été déterminé. Sur les données collectées, des traitements statistiques ont été réalisés. Les résultats ont révélé un rendement moyen compris entre 26,62 et 56,5 t/ha. Un lien clair a été établi entre les facteurs étudiés et le rendement selon la relation : $Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2$. Par ailleurs, le coefficient de détermination (proche de 0,85), le taux de déviation (6,93 %) et la significativité de l'ANOVA révèlent que le modèle postulé est adéquat pour décrire le processus étudié. Les conditions optimales identifiées pour l'épandage du digestat sont une concentration et un volume respectifs de 75,03 % et 1,25 L pour un rendement maximal de 50,24 %. Ce modèle a été validé et peut être utilisé pour prédire le rendement en tout point du domaine d'étude.

ABSTRACT

Digestate is a biological fertilizer derived from the methanization of cassava effluent. For its efficient use in cassava cultivation, the optimum conditions for spreading must be identified. The aim of the present study is therefore to determine the best conditions leading to maximum fresh tuber yield for the use of this digestate. To achieve this, a two-factor composite central design using response surface methodology was followed. Thus, 13 cultivation trials were carried out, varying the digestate concentration (X_1) from 25% to 100% and the volume (X_2) to be spread from 0.5 to 2 L. At the end of the 12-month trials, root yields were determined. Statistical analyses were carried out on the data collected. The results showed an average yield of between 26.62 and 56.5 t/ha. A clear link was established between the factors studied and the yield according to the relationship: $Y_{\text{yields}} = 49.01 + 5.21 X_1 - 5.51 X_1^2 - 7.47 X_2^2$. Furthermore, the coefficient of determination (close

to 0.85), the deviation rate (6.93%) and the significance of the ANOVA reveal that the postulated model is adequate to describe the process studied. The optimum conditions identified for digestate spreading are a concentration and volume of 75.03% and 1.25 L respectively, for a maximum yield of 50.24%. This model has been validated and can be used to predict yield at any point in the study area.

2. INTRODUCTION

La fermentation des effluents de manioc dans des conditions comprenant une enceinte confinée, de la bouse de vache et de l'urine conduit à la production de biogaz combustible (Kpata-Konan *et al.*, 2011). Ce processus biologique libère en plus du biogaz, un digestat stable, désodorisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes (Couturier *et al.*, 2001). Selon Wallrich *et al.* (2021), ce digestat peut même être utilisé comme engrais biologique pour l'agriculture. En effet, le digestat liquide produit à la suite de la fermentation des effluents de manioc pourrait valablement remplacer les produits fertilisants commercialisés. Il a été utilisé avec succès dans la culture de haricot vert et de concombre en Côte d'Ivoire permettant d'améliorer les rendements de 11 et 13 % respectivement (Nitidae, 2020). Un dosage de 50 % a alors donné les meilleurs résultats. Dans le cas de la culture du manioc, quelles peuvent être les dosages de digestat conduisant aux meilleurs résultats en termes de rendement en racines fraîches ? La détermination des conditions optimales d'épandage de digestat issu de la méthanisation d'effluent de manioc est indispensable pour une utilisation efficiente. C'est d'autant plus important en ces périodes où la question d'économie circulaire bat son plein. Par ailleurs, un sous dosage de digestat utilisé comme engrais biologique est cause de baisse de rendement pendant qu'un surdosage est source de pollution (DDAE, 2014 ; Jacquin, 2023). C'est pourquoi, l'optimisation qui consiste à rechercher les conditions idéales pour la meilleure réponse est une des voies à explorer dans ce cas. Pour l'optimisation, plusieurs approches peuvent être suivies. Celle qui retient l'attention dans la présente étude est

l'utilisation de plans d'expériences. Ces plans sont un ensemble d'essais organisés pour atteindre un but précis : infirmer ou confirmer une hypothèse. Une multitude de dispositifs expérimentaux existent dont ceux utilisant la méthodologie des surfaces de réponses comme le plan composite centré ordinaire. De nombreux travaux (Goupy et Creighton, 2006 ; Osei-Owusu *et al.*, 2024) ont porté sur l'efficacité de ces plans et leur utilité. Ces plans sont applicables à de nombreux domaines. Adjoumani (2021) les a utilisés dans le traitement des eaux usées. Dans son étude, les conditions optimales d'activation des argiles pour le traitement des eaux ont été déterminées à partir de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR). Guemache et Dadache (2021) ont recherché par cette méthodologie de surface de réponse des conditions optimales d'extraction des composés phénoliques totaux dans des déchets de fenouil. Osei-Owusu *et al.* (2024) ont utilisé cette approche pour prédire le rendement en biogaz et les effets synergiques de trois types de déchets lors de leur co-digestion anaérobie. La présente étude vise donc à déterminer les conditions optimales d'épandage d'un digestat liquide issu du processus de bio méthanisation d'effluents de manioc, utilisé dans la culture du manioc. Le dosage approprié ainsi que le volume à répandre sur les plants sont les paramètres à optimiser. La détermination de ces conditions permettra une utilisation efficiente en évitant le sous dosage d'une part et le surdosage d'autre part. Enfin, la modélisation de ce processus d'épandage permettra de prédire en fonction des paramètres du digestat le rendement en racines.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1 Matériel biologique : Le matériel biologique est constitué de digestat liquide issu de la méthanisation d'effluents de manioc, d'urine et de bouse de vache. Ce digestat a été obtenu à l'issu de la dynamisation de la production de biogaz sur un site de fabrication d'attiéké du projet VECDA à Daloa (Région du Haut-Sassandra, Côte d'Ivoire), trois mois

après son implantation. Une quantité de 700 L de digestat a été collectée et conditionnée dans des bidons de 25 L. Quelques caractéristiques physicochimiques de ce digestat sont consignées dans le tableau 1. En outre, les boutures de la variété culturale Yacé utilisées proviennent d'une exploitation agricole spécialisée dans la production de boutures.

Tableau 1 : Paramètres physicochimiques du digestat utilisé

Paramètres	Valeurs
pH	8,28 ± 0,05
DCO (mg O ₂ /L)	228,87 ± 38,14
DBO (mg O ₂ /L)	64,67 ± 0,58
COT (mg/L)	61 ± 0,01
NTK (g/L)	2,2 ± 0,01
Phosphore (g/L)	1,157 ± 0,003
Potassium (g/L)	0,99 ± 0,01
C/N	0,027 ± 0,001

DCO : Demande chimique en oxygène ; DBO : Demande biochimique en oxygène ; COT : Carbone organique total ; NTK : Azote total ; C/N : Rapport carbone/azote

3.2 Méthodes

3.2.1 Préparation des parcelles expérimentales et conduite des opérations : L'expérimentation s'est déroulée sur une parcelle ayant subi un décapage une année plus tôt lors d'une opération de lotissement. Afin de s'assurer de l'homogénéité de la parcelle, une visite y a été réalisée. Elle a permis de constater qu'il n'existe pas de pente ni d'autres gradients d'hétérogénéité perceptibles. Cette parcelle a donc été subdivisée en 13 unités expérimentales correspondant chacune à un traitement. Sur chaque unité expérimentale, ont été mises en terre 16 boutures de manioc de variété Yacé en respectant l'itinéraire technique. Celle-ci recommande un intervalle de 1 m entre les boutures en largeur et 1 m en longueur. Les traitements ont été affectés aux unités expérimentales de façon aléatoire. L'épandage des différents dosages de digestat a débuté sur des plants âgés de trois mois. Un mois après le 1er épandage, un deuxième a eu lieu. Le troisième et dernier épandage a été réalisé un mois après le précédent. Au total trois épandages ont été effectués. Il est souligné que quatre sarclages ont été effectués.

3.2.2 Détermination du rendement en racines de manioc : Le rendement a été déterminé sur chaque unité expérimentale. Il a été calculé selon la formule décrite par Kouadio et al. (2023) :

$$\text{Rdt (t/ha)} = \text{MF} \times \text{DP} \quad (1)$$

Rdt : Rendement en racines fraîches (t/ha), MF : Masse moyenne de racines fraîches par plant (tonnes), DP : Densité de plantation (10 000 plants/ha)

3.2.3 Méthodologie des surfaces de réponses : plan composite centré

3.2.3.1 Inventaire des facteurs et réponses : Deux facteurs ont été retenus à savoir la concentration (%) et le volume (L) du digestat à répandre par plant de manioc. La réponse enregistrée a concerné le rendement en racines de manioc (tonnes/ha).

3.2.3.2 Définition du domaine expérimental : Le Plan composite centré fixe pour chaque facteur, 5 niveaux codés que sont $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$ et $+\alpha$ (Adjoumani, 2021). Les niveaux $-\alpha$ et $+\alpha$ délimitent le domaine expérimental. Pour les deux facteurs étudiés, α est pris égale à 1,414. La formule décrite par Feinberg (1996) a été utilisée pour le calcul des valeurs des différents niveaux :



$$x_k = x_{\text{centre}} + z_k \times \frac{(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})}{(z_{\text{max}} - z_{\text{min}})} \quad (2)$$

Avec $x_{\text{centre}} = (x_{\text{max}} - x_{\text{min}})/2$

x_k : Valeur naturelle d'un niveau k

z_k : Valeur codée d'un niveau k

x_{max} : Valeur naturelle pour le niveau maximal

x_{min} : Valeur naturelle pour le niveau minimal

x_{centre} : Valeur naturelle pour le niveau central

z_{max} : Valeur codée correspondant à +1,414

z_{min} : Valeur codée correspondant à -1,414

Les différentes valeurs obtenues ont donné le domaine expérimental (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs des différents niveaux de facteurs

Facteurs	Niveaux Z				
	-1,414	-1	0	+1	+1,414
X ₁	25	35,98	62,5	89,02	100
X ₂	0,50	0,72	1,25	1,78	2

X₁ : Concentration du digestat (%) ; X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant

3.2.3.3 Établissement du tableau d'expérimentation : Trois catégories d'essais ont constitué le plan utilisé (Tableau 3). Il s'agit de :

- 4 essais factoriels constitués d'essais correspondant aux niveaux codés -1 et +1 ;
- 4 essais en étoile qui sont des points positionnés sur la sphère de rayon α délimitant le domaine expérimental ;
- 5 essais au centre du domaine (Feinberg, 1996). Ces essais ont été réalisés en prenant le niveau codé 0 pour les facteurs (Adjoumani, 2021).

Au total, 13 essais correspondant aux différents dosages de digestats ont été effectués en les affectant de manière aléatoire aux unités expérimentales précédemment préparées. Pour la préparation des dosages, plusieurs dilutions du digestat contenu dans des bidons ont été réalisées en utilisation de l'eau de robinet. Chaque dosage du digestat comprend un pourcentage de dilution et un volume à répandre par plant de manioc. Les différents dosages retenus sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Tableau d'expérimentation

Essais	Valeurs codées		Valeurs réelles	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	-1	-1	35,98	0,72
2	+1	-1	89,02	0,72
3	-1	+1	35,98	1,78
4	+1	+1	89,02	1,78
5	-1,414	0	25	1,25
6	0	-1,414	62,5	0,5
7	+1,414	0	100	1,25
8	0	+1,414	62,5	2
9	0	0	62,5	1,25
10	0	0	62,5	1,25
11	0	0	62,5	1,25
12	0	0	62,5	1,25
13	0	0	62,5	1,25

X₁ : Concentration du digestat (%) ; X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant

3.2.3.4 Détermination des coefficients du modèle postulé : Pour le plan central composite à deux facteurs (X_1 et X_2), l'équation du modèle postulé est polynomiale de second degré :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2$$

Avec $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}$ et a_{22} , les coefficients du modèle ; Y , le rendement en racines de manioc ; X_1 , la concentration du digestat et X_2 , le volume du digestat à répandre par plant.

Pour la détermination des valeurs de ces coefficients, une régression linéaire multiple a été effectuée avec le logiciel Design Expert 13.

3.2.3.5 Détermination des paramètres de qualité du modèle : La qualité du modèle a été évaluée à partir du coefficient de détermination R^2 , du pourcentage de déviation (%D) et la significativité de l'ANOVA. Des tests de normalité de distribution des résidus ont été également effectués. La formule utilisée pour le calcul du taux de déviation est la suivante :

$$D(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_{iexp} - Y_{ipred}|}{Y_{iexp}} \quad (3)$$

4 RÉSULTATS

4.1 Rendement en racines de manioc :

Après 12 mois de plantation et les différentes séries d'épandage réalisées, le rendement enregistré pour les différents dosages de

Avec Y_{iexp} : Rendement observé pour l'essai i ;

Y_{ipred} : Rendement prédit par le modèle pour l'essai i

N : Nombre d'essais

3.2.3.6 Détermination des conditions optimales d'épandage du digestat : Des graphes représentant des surfaces de réponses et des courbes d'isoreponses ont été produits à partir de l'équation du modèle obtenu en utilisant le logiciel STATISTICA 7. Release. De plus, le Solveur d'Excel avec l'algorithme GRG a été utilisé pour déterminer les valeurs optimales de concentration et de volume à répandre par plant de manioc lors de l'épandage.

3.2.3.7 Tests de contrôle : Pour valider le modèle, ont été réalisés des tests de contrôle. Pour ce faire les conditions optimales identifiées ont été utilisés. Au total, trois essais ont été effectués. Les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs prédites par le modèle et un pourcentage de déviation a été calculé aux fins d'apprécier la qualité de l'ajustement.

digestat est compris entre 26,62 et 56,50 t/ha (Tableau 4). Le rendement moyen est de $41,02 \pm 4,93$ t/ha.

Tableau 4 : Rendements en racines de la variété Yacé récoltée 12 mois après plantation

Essais	Valeurs réelles des facteurs		Rendement (t/ha)
	X_1	X_2	
1	35,98	0,72	37,00
2	89,02	0,72	42,50
3	35,98	1,78	26,62
4	89,02	1,78	37,80
5	25,00	1,25	29,16
6	62,50	0,50	38,85
7	100,00	1,25	46,87
8	62,50	2,00	29,35
9	62,50	1,25	45,20
10	62,50	1,25	56,50
11	62,50	1,25	51,05
12	62,50	1,25	40,25
13	62,50	1,25	52,05

X_1 : Concentration du digestat (%) ; X_2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant

4.2 Modélisation de l'épandage du digestat et qualité du modèle : Les résultats de l'analyse de variance du modèle ont révélé que l'effet du modèle est significatif ($p < 0,05$). Pour la qualité du modèle, l'erreur expérimentale (169,86) est du même ordre de grandeur que l'erreur résiduelle (160,76) et l'erreur d'ajustement du modèle n'est pas significative ($p > 0,05$) (Tableau 5). Par ailleurs, les coefficients significatifs du modèle sont 49,01 (a_0), 5,21 (a_1), -5,51 (a_{11}) et -7,47 (a_{22}) (Tableau 6). L'effet principal du facteur concentration du digestat sur le rendement a été significatif. De plus, les effets quadratiques des facteurs étudiés (concentration et volume du digestat) ont été significatifs sur le rendement en racines fraîches de manioc (Tableau 6). Dès lors le modèle postulé pour le rendement s'écrit :

$$Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2$$

Avec X_1 : Concentration du digestat (%);

X_2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant.

Par ailleurs, la normalité des résidus du modèle a été vérifiée (Figure 2). Les résidus sont très proches de la droite théorique montrant leur distribution selon une loi normale. En outre, leur représentation en fonction des valeurs prédites a été faite (Figure 3). A l'analyse, aucune structure précise n'apparaît et la répartition des points semble être au hasard. Un coefficient de détermination R^2 de l'ordre de 0,83, supérieur à 0,80 et un taux de déviation (6,93 %) inférieur à 10 % ont été obtenus (Tableau 7). Le modèle est par conséquent, satisfaisant.

Tableau 5 : Analyse de variance pour le modèle de surfaces de réponse

Source	Sommes des carrés	Degré de liberté	Carré moyen	F	p	Significativité
Modèle	861,71	5	172,34	7,10	0,01	Sig.
Erreur résiduelle	169,86	7	24,27			
Erreur d'ajustement	9,10	3	3,03	0,07	0,97	Ns
Erreur expérimentale	160,76	4	40,19			
Total	1031,57	12				

Sig. : Significatif ; Ns : Non significatif

Tableau 6 : Coefficients du modèle postulé et effets des facteurs sur le rendement en tubercules de manioc

Facteurs	Notation des coefficients	Coefficients de régression	Erreur type	p
Constante	a_0	49,01	2,20	0,00
X_1	a_1	5,21	1,74	0,02
X_2	a_2	-3,56	1,74	0,08
$X_1 X_2$	a_{12}	1,42	2,46	0,58
X_1^2	a_{11}	-5,51	1,86	0,02
X_2^2	a_{22}	-7,47	1,86	0,00

X_1 : Concentration du digestat (%); X_2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant; $X_1 X_2$: Effet d'interaction des facteurs concentration et volume de digestat; X_1^2 : Effet quadratique du facteur concentration du digestat; X_2^2 : Effet quadratique du facteur volume de digestat. Les coefficients sont significatifs à $p < 0,05$.

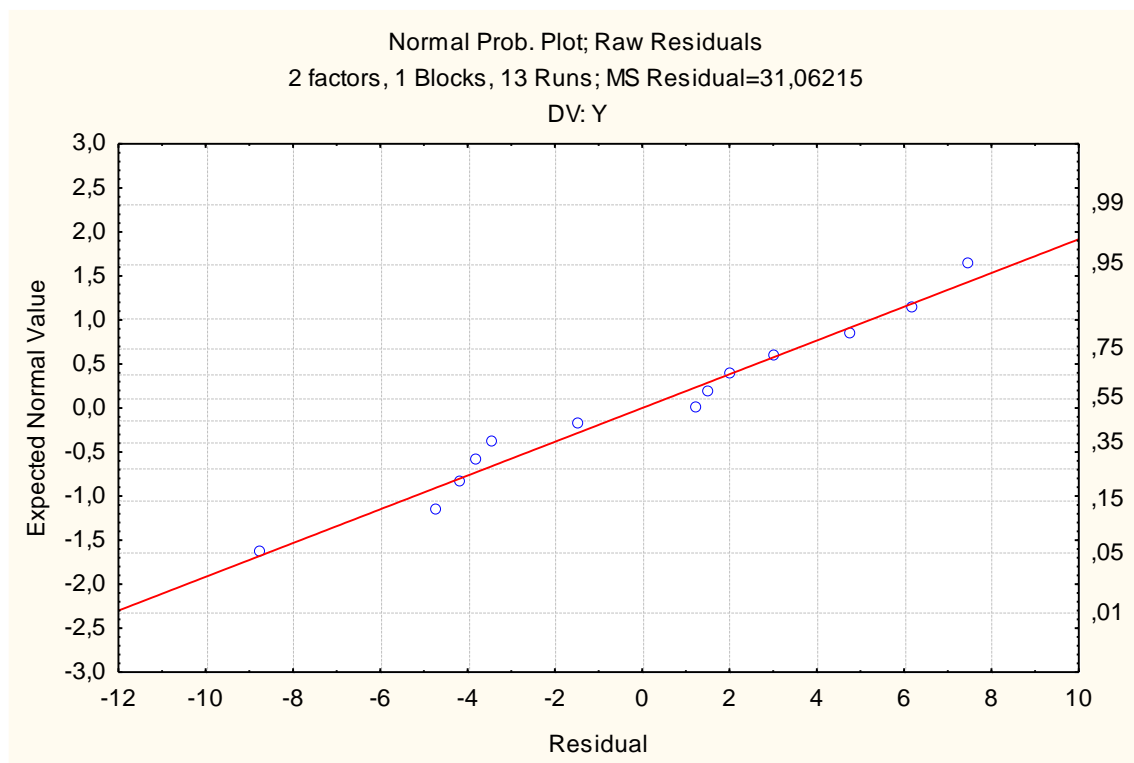


Figure 2 : Normalité des résidus

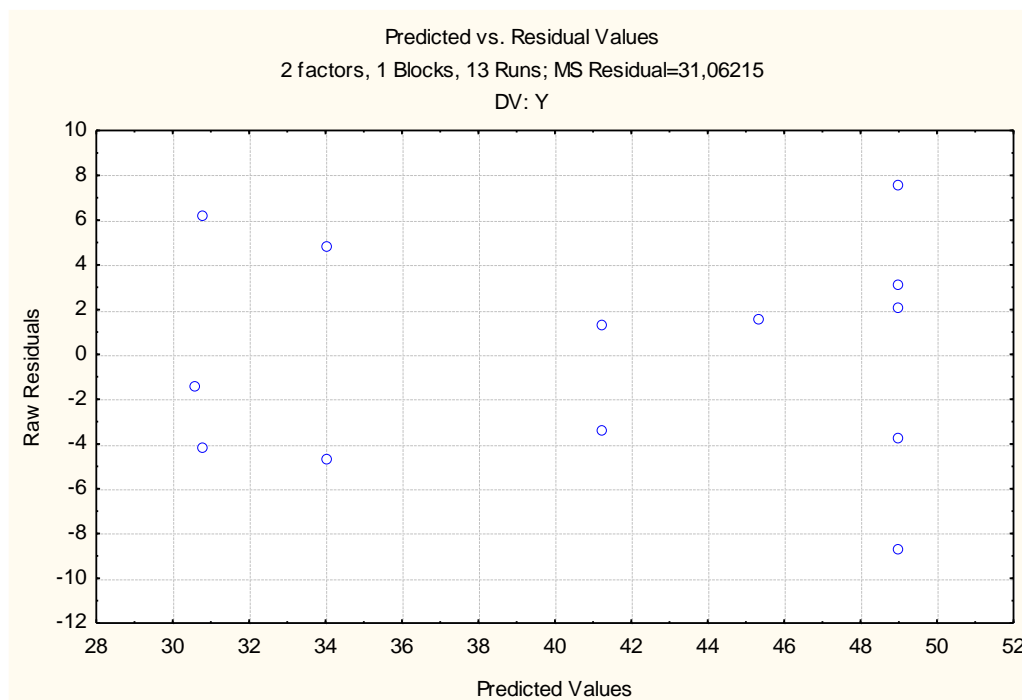


Figure 3 : Représentation des résidus en fonction des valeurs prédites par le modèle

Tableau 7 : Coefficient de détermination et taux de déviation du modèle

Paramètres	Valeurs
Coefficient de détermination R^2	0,83538
Coefficient de détermination ajusté $R^2_{ajusté}$	0,7178
Pourcentage de déviation (%)	6,9284

4.3 Paramètres optimaux ou stationnaires d'épandage du digestat : Un modèle de surface de réponse a été utilisé pour décrire le processus étudié. Le rendement maximum qui peut être atteint est supérieur à 50 t/ha (50,24 t/ha) (Figures 4 et 5). Il est

obtenu lorsque la concentration (X_1) et le volume du digestat (X_2) atteignent respectivement 0,4727 et $3,38.10^{-9}$ en valeurs codées. Les valeurs réelles correspondantes sont 75,03 % pour la concentration et 1,25 L pour le volume du digestat.

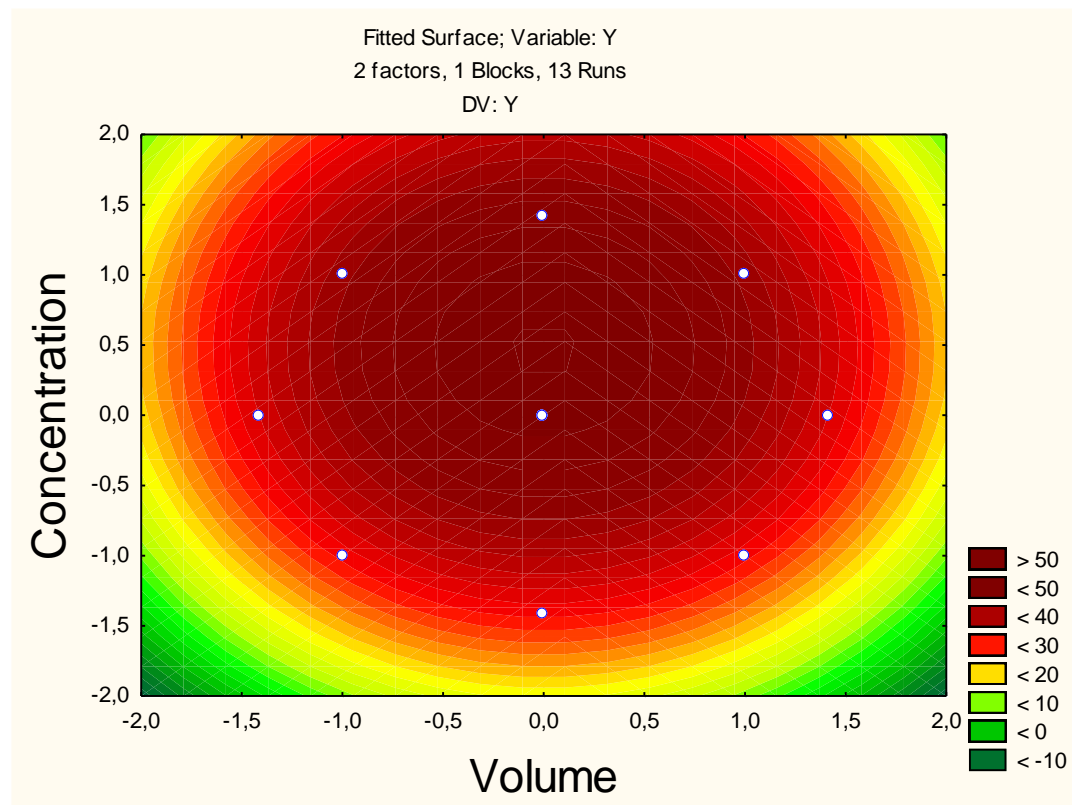


Figure 4 : Courbes d'isoréponses pour le rendement en racines fraîches de manioc

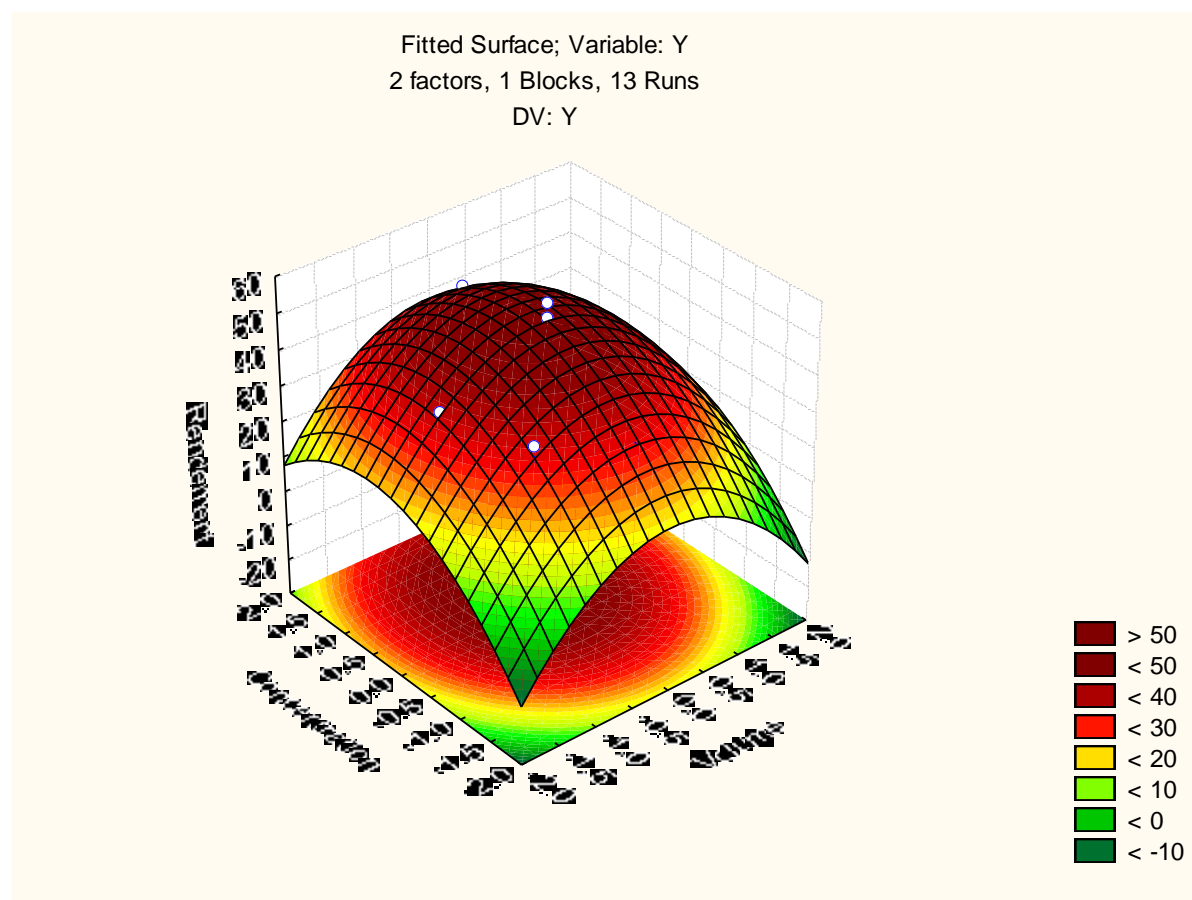


Figure 5 : Effet de la concentration et du volume de digestat sur le rendement en racines de manioc

4.4 Tests de contrôle : Les résultats des tests de contrôle ainsi que les conditions de réalisation des essais sont consignés dans le tableau 8. Le rendement moyen obtenu est de

47,06 t/ha. En outre, le pourcentage de déviation (7,14 %) est inférieur à 10 %. Ainsi, l'adéquation du modèle aux valeurs observées est satisfaisante.

Tableau 8 : Résultats des tests de contrôle dans les conditions optimales d'épandage du digestat

Essais	Valeurs réelles		Rendement prédit (t/ha)	Rendement Expérimental (t/ha)	Résidus en valeur absolue	%Déviation
	X ₁	X ₂				
14	75,03	1,25	50,24	47,80	2,44	
15	75,03	1,25	50,24	43,30	6,94	7,14
16	75,03	1,25	50,24	50,10	0,14	
Moyenne			50,24	47,06		

X₁ : Concentration du digestat (%); X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant

5 DISCUSSION

Les rendements en tubercules frais enregistrés dans la présente étude avec le digestat utilisé à différentes concentrations sont compris entre 26,62 et 56,6 t/ha. Des valeurs plus élevées (63 t/ha) ont été rapportées par Bakayoko et al. (2007) qui travaillaient en Côte d'Ivoire, sur l'intensification de la culture du manioc. Cette

différence pourrait s'expliquer par le fait que les mêmes fertilisants n'ont pas été utilisés. En effet, contrairement à la présente étude, ces auteurs ont utilisés de la fumure de volailles et de bovins. De plus, les racines ont été récoltées 15 mois après plantation contrairement à celles de la présente étude qui sont âgées de 12 mois.



Bakayoko et al. (2012) ont rapporté des rendements plus élevés pour des variétés améliorées de manioc oscillant entre 70 et 76 t/ha. La recherche de relation entre les paramètres d'épandage du digestat et le rendement en racines fraîches a conduit à l'utilisation de plans d'expériences. En effet, les plans d'expériences s'apparentent à un système de boîte noire dans lequel, est recherché, l'effet des facteurs sur une réponse (Goupy, 2006 ; Pillet, 2011). Ces plans sont applicables à de nombreux domaines et sont particulièrement importants et utiles lorsqu'on recherche le lien entre une réponse (y) et des variables (xi). Concernant l'épandage d'engrais, un sous dosage est cause de baisse de rendement pendant qu'un surdosage est source de pollution (Jacquin, 2023). Il importe donc d'identifier les meilleures conditions pour cette opération. A ce propos, les coefficients significatifs du modèle postulé pour le plan central composite ont permis de déterminer l'équation reliant les facteurs au rendement qui suit :

$$Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2.$$

Le rendement est donc lié aux facteurs étudiés que sont le taux de dilution et le volume du digestat à répandre par plant de manioc. D'ailleurs, le coefficient de détermination R^2 est supérieur à 0,80 ; ce qui montre que le modèle est bon (Adjoumani, 2021). Selon Goupy et Creighton (2006), le R^2 est un excellent indicateur de la qualité du modèle lorsque le nombre de points expérimentaux différents est plus que le nombre de coefficients dans le modèle postulé. C'est le cas dans la présente étude. En plus de ce coefficient, l'étude de la normalité des résidus du modèle et la représentation des résidus en fonction des valeurs prédites ont montré d'une part que les points sont proches de la droite théorique et d'autre part qu'ils sont répartis au hasard de sorte qu'il n'apparaît pas de structures particulières. Dès lors, on suppose qu'aucune autre information ne peut être extraite des données (Goupy et Creighton,

2006). Ceci confirme bien l'adéquation entre les rendements prédits par le modèle et ceux déterminés expérimentalement. Cette bonne adéquation montre que le modèle de surface de réponse présenté par l'équation de second degré, peut effectivement être utilisé pour décrire le processus étudié (Adjoumani, 2021). Ainsi, les conditions optimales (concentration et volume) d'utilisation du digestat peuvent être recherchées par la méthodologie des surfaces de réponses. On parle alors d'optimisation. Il s'agit de rechercher les conditions idéales qui permettent d'avoir la meilleure réponse. Le rendement maximal obtenu avec les graphes de surface de réponses et le solveur d'Excel est de 50,24 %. Cette valeur est atteinte lorsque les valeurs du taux de dilution et de volume du digestat sont respectivement de 75,03 % et 1,25 L en valeurs réelles. Le rendement de 50 t/ha a été rapporté par Kosh-Komba et al. (2021) qui travaillaient sur les bonnes pratiques pour la production de manioc en République Centrafricaine. Ils ont utilisé une combinaison de fertilisants organiques et minéraux. Par ailleurs, les tests de contrôle réalisés en vue de la validation des résultats ont donné un pourcentage de déviation entre les valeurs prédites et celles observées de l'ordre de 7,14 %. Ce taux de déviation, inférieur à 10 %, montre que le modèle est bon (Djomdi *et al.*, 2020). Ce modèle peut donc être utilisé pour prédire les rendements en racines fraîches de manioc lorsqu'on connaît les valeurs des facteurs. En outre, il est bon de souligner que l'effet des facteurs étudiés sur le rendement est non linéaire au regard des termes quadratiques du modèle. Le digestat peut être utilisé dans la culture du manioc. Ainsi, pour l'utilisation efficiente du digestat, un taux de dilution de 75,03 % doit être appliqué et un volume de 1,25 L doit être répandu par plant. Ce dosage doit être épandu trois fois au cours du cycle dès le 3^e mois à intervalle d'un mois. Avec ces conditions, un sous-dosage ou un surdosage sera évité.

6 CONCLUSION

La méthodologie des surfaces de réponses appliquée au processus d'épandage d'un digestat utilisé comme engrais biologique dans

la culture du manioc s'est révélée être très utile. Le rendement en racines fraîches est influencé par la concentration et le volume du digestat.

Les conditions optimales d'épandage du digestat issu de la méthanisation d'effluents de manioc sont un taux de dilution de 75 % et un volume de 1,25 L à répandre par plant. Avec ces conditions, le rendement maximal est de

50,24 t/ha de la variété Yacé. Les conditions optimales déterminées permettent d'éviter le sous dosage ou le surdosage. Pour ce digestat, l'utilisation efficiente nécessite l'observation de ces conditions optimales d'épandage.

7 RÉFÉRENCES

- Adjoumani YJ : 2021. Activation acide des argiles de Dabou et Katiola (Côte d'Ivoire) pour le traitement des eaux usées : élimination des ions dihydrogénophosphate ($H_2PO_4^-$), nitrate (NO_3^-) et cadmium (Cd^{2+}). Thèse de doctorat, EDP, Génie des Procédés, INPHB-Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). 215 pp.
- Bakayoko S, Kouadio KKH, Soro D, Tschannen A, Nindjin C, Dao D. et Girardin O : 2012. Rendements en tubercules frais et teneurs en matière sèche de soixante-dix nouvelles variétés de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) cultivées dans le centre de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences* 14(2) : 1961-1977.
- Bakayoko S, Nindjin C, Dao D, Tschannen A, Girardin O. et Assa A : 2007. Fumure organique et productivité du manioc (*Manihot esculenta* CRANTZ) en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 19(3) : 271-279.
- Couturier C, Berger S. et Meiffren I : 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines : état des lieux, état de l'art. SOLAGRO, France, 36 pp.
- DDAE : 2014. Etude des dangers. In : Plan d'épandage digestat-FERTI NRJ. Edition ROUTIER/DDAE, pp. 304-310.
- Djomdi DR, Ejoh R, Ndjouenkeu R and Michaud P : 2020. Application of Peleg Model on Hydrothermal Treatment of Tiger Nut Tubers (*Cyperus esculentus*) and Effect of Dehulling Efficiency on Microbial Load. *Journal of Food Science and Nutrition* 6(4): 070.
- Feinberg M : 1996. La validation des méthodes d'analyse. Une approche chimiométrique de l'assurance qualité au laboratoire. Edition MASSON, Paris (France), 397 pp.
- Goupy J : 2006. Les plans d'expériences. *Revue MODULAD* 34 : 74-116.
- Goupy J. et Creighton L : 2006. Introduction aux plans d'expériences. 3^e Edition L'Usine Nouvelle – DUNOD, 336 pp.
- Guemache K. et Dadache N : 2021. Valorisation des déchets de fenouil : Optimisation par méthodologie de surface de réponse des conditions d'extraction assistée par micro-onde des composés phénoliques totaux et de l'activité antioxydante. Mémoire de Master Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi BBA, République Algérienne Démocratique et Populaire. 50 pp.
- Jacquin O : 2023. Méthanisation et risques de pollutions liées à l'épandage de digestats. Question écrite n°06508 - 16^e législature. *Journal Officiel du Senat du* 27/04/2023, 2766.
- Kosh-Komba E, Zaman M. et De Mon-Zoni GJL : 2021. Les bonnes pratiques de productions du manioc en république Centrafricaine. 2^e édition, ICRA/AIEA/FAO, 27 pp.
- Kouadio KH, Koné WA, Touré TG, Abibi DAH, Konan LN, Assi AJ, N'guessan AJD, Yapo RG, Dibi EB et Massé D : 2023. Amélioration du rendement du manioc (*Manihot esculenta* CRANTZ) par la jachère mixte *Chromolaena odorata-Cajanus cajan* au Centre de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 35 (1) : 63-74.
- Kpata-Konan NE, Konan KF, Kouamé KM, Kouamé YF, Gnagne T. et Tano K : 2011. Optimisation de la biométhanisation des effluents de manioc issus de la filière de fabrication de l'attiéké (semoule de manioc). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5 : 2330-2342.



- Nitidae : 2020. Valorisation du digestat liquide issu de la biodigestion de jus de manioc. Rapport NITIDAE, 15 pp. https://www.nitidae.org/files/6ff5049c/rapport_de_valorisation_du_digestat_liquide_issu_de_la_biodigestion_de_jus_de_manioc.
- Osei-Owusu AB, Arthur R, Baidoo FM, Oduro-Kwarteng S. and Amenaghawon AN : 2024. Anaerobic co-digestion of human excreta, food leftovers and kitchen residue: 1 ternary mixture design, synergistic effects and RSM approach. *Helvion* 10 : e24080.
- Pillet M : 2011. Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI. Editions 2011, 254 pp.
- Wallrich A, Poirier M, Diomard I, Savary C, MIRSPAA : 2021. Qualité agronomique des digestats en Normandie. Agricultures et territoires/Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation (France), 35 pp.

PUBLICATION 2

**Valeur qualitative du digestat issu d'un digesteur continu
des effluents de manioc**



Valeur qualitative du digestat issu d'un digesteur continu des effluents de manioc

Yapi Jean Louis Fernandez OSSEPE, Anauma Casimir KOKO*,
Nazo Edith KPATA-KONAN et N'zué Benjamin YAO

Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, Département de Biochimie et Microbiologie, UFR
Agroforesterie, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant ; E-mail : anaumako@yahoo.fr ; Tel : +2250707364095

Received: 16-04-2024

Accepted: 12-08-2024

Published: 31-08-2024

RESUME

La méthanisation des effluents issus de la fabrique d'attiéké produit en plus du biogaz, du digestat qui pourrait être utilisé en agriculture. Cette étude avait pour objectif de déterminer la qualité fertilisante de ce digestat en vue de son utilisation dans la culture du manioc. Ainsi, des digestats issus de trois productions ont été caractérisés selon des méthodes conventionnelles. Les données recueillies ont été soumises à des traitements statistiques. Les résultats ont révélé que les digestats avaient un pH moyen de $8,42 \pm 0,18$, une DCO de $207,68 \pm 60,64$ mg O₂/L, une DBO de $58,83 \pm 29,02$ mg O₂/L et un COT de $35,81 \pm 22,25$ mg/L. Ils renfermaient également des matières fertilisantes dont l'azote ($1,5 \pm 0,07$ g/L), le phosphore ($0,738 \pm 0,415$ g/L) et le potassium ($1,65 \pm 0,60$ g/L). Des éléments traces métalliques ont été quantifiés avec des valeurs moyennes conformes à la réglementation. Par ailleurs, les analyses microbiologiques ont montré la présence de coliformes totaux, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* d'une part et l'absence des *E. coli*, *Salmonella* sp, *Clostridium perfringens* et des ASR d'autre part. Dans l'ensemble, les résultats de l'étude ont montré que les digestats caractérisés présentaient des potentialités pour un épandage dans les cultures.

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Epandage, cultures, valorisation, digestat, métaux lourds.

Qualitative value of digestate from a continuous cassava effluent digester

ABSTRACT

Methanization of effluent from attiéké factory produces, in addition to biogas, digestate that could be used in agriculture. The aim of this study was to determine the fertilizing quality of this digestate, with a view to its use in cassava cultivation. Digestates from three productions were characterized using conventional methods. The data collected was subjected to statistical analyses. The results showed that the digestates had an average pH of 8.42 ± 0.18 , a COD of 207.68 ± 60.64 mg O₂/L, a BOD of 58.83 ± 29.02 mg O₂/L and a TOC of 35.81 ± 22.25 mg/L. They also contained fertilizing elements including nitrogen (1.5 ± 0.07 g/L), phosphorus (0.738 ± 0.415 g/L) and potassium (1.65 ± 0.60 g/L). Trace metallic elements were quantified with average values in accordance

with regulations. Microbiological analyses showed the presence of total coliforms, *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* on the one hand, and the absence of *E. coli*, *Salmonella* sp, *Clostridium perfringens* and RSA on the other. Overall, the results of the study showed that the digestates characterized had the potential to be spread on crops.

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Spreading, crops, valorization, digestate, heavy metals.

INTRODUCTION

La méthanisation est un processus de décomposition de la matière organique conduisant à la formation de deux composés valorisables : le biogaz et le digestat (Doublet et al., 2004 ; Kpata-Konan et al., 2011). Une contrainte majeure dans le développement des unités de méthanisation est la gestion efficace des digestats. En effet, les grandes quantités de digestats produites peuvent contribuer à un bilan environnemental et économique négatif pour l'installation de méthanisation (Tremier et al., 2014).

Pour y remédier, il s'avère nécessaire de mettre en place des systèmes de valorisation des digestats. Parmi les procédés de valorisation, l'épandage des digestats au champ apparaît comme une alternative crédible. Il a été utilisé avec succès dans la culture de haricot vert et de concombre en Côte d'Ivoire permettant d'améliorer les rendements de 11 et 13% respectivement (NITIDAE, 2020). Toutefois, les effets du digestat sur le rendement des cultures semblent différer en fonction du type de digestat, du type de cultures et des caractéristiques du sol (Tremier et al., 2014). Par conséquent, pour une meilleure utilisation des digestats dans les cultures, leur caractérisation tant physicochimique que microbiologique s'impose. La connaissance du produit est d'ailleurs la première étape de toute recherche de développement technologique (Miche, 1973). Par ailleurs, il est admis que la qualité physicochimique du digestat dépend principalement de la qualité des intrants qui sont digérés pendant le processus de la méthanisation (Doublet et al., 2004). Parmi les effluents utilisés dans la méthanisation figurent ceux issus des fabriques d'attiéké selon Kpata-Konan et al. (2019). Ces auteurs ont utilisé dans le cadre de leur étude, un digesteur

discontinu dans lequel les différents intrants sont renouvelés à chaque production. L'aspect des digestats issus de la méthanisation des effluents de manioc dans un digesteur continu n'a pas encore été abordé. Pourtant, une utilisation efficace de ces digestats en agriculture nécessite que leurs caractéristiques physicochimiques, leurs teneurs en matières fertilisantes et leur innocuité soient investiguées.

La présente étude vise donc à caractériser les digestats d'effluents de manioc produits dans un procédé de méthanisation en fonctionnement continu. La connaissance de la composition physicochimique, des teneurs en éléments traces métalliques et de la qualité microbiologique des digestats permettra d'envisager leur utilisation dans la culture du manioc sous forme d'engrais biologique.

MATERIEL ET METHODES

Matériel biologique

Le matériel biologique est un digestat liquide composé d'effluents de manioc, de l'urine humaine et de la bouse de vache (Figure 1). Ce digestat a été obtenu grâce à un digesteur continu dans lequel seul l'effluent est renouvelé, sur un site du projet VECDA à Daloa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire).

Méthodes

Production du digestat

Pour la production du digestat, des effluents de manioc, de l'urine humaine et de la bouse de vache ont été collectés. L'effluent de manioc provenait de l'activité des productrices installées sur le site du projet VECDA. Il était composé d'eau de lavage de la pulpe obtenue après l'épluchage des racines de manioc et du jus issu du pressage de la pâte de manioc fermenté. L'urine a été collectée à

travers les urinoirs et les toilettes sèches à déviation d'urine (TSDU) installés dans la ville (au niveau des marchés, des maquis, des restaurants et de l'Université). Concernant la bouse de vache, elle provenait du centre d'abattage de la ville de Daloa. Une fois les intrants collectés, s'en est suivie l'alimentation du digesteur.

Initialement, le digesteur a été alimenté avec de la bouse de vache et de l'eau pour ensemercer le milieu réactionnel et amorcer la production du biogaz. Ensuite, de l'urine humaine a été ajoutée aux effluents de manioc collectés pour neutraliser leur pH. Pour ce faire, une quantité d'urine équivalant à 2/3 du volume de l'effluent à traiter a été utilisée. Une fois la neutralisation achevée, un volume de 200 L du mélange obtenu est pompé à l'aide d'une motopompe et introduit au fond du digesteur au moyen d'un tuyau. Le mélange ajouté pousse le digestat produit vers la sortie à travers le chemin des fosses dédiées à sa réception. Le renouvellement de l'effluent neutralisé a été effectué tous les 3 jours avec un même volume de 200 L.

Echantillonnage des digestats

Trois productions de digestat ont été faites au bout de trois mois à intervalle d'un mois chacune. Par production, trois échantillons de digestat de 25 L chacun ont été prélevés dans des bidons d'une capacité de 25 L et entreposés dans un hangar à la température ambiante. Ces échantillons soigneusement étiquetés ont été utilisés pour les analyses ultérieures tant physico-chimiques que microbiologiques.

Analyses physico-chimiques des digestats produits.

Les paramètres tels que le pH, la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO), la teneur en carbone organique total (COT) et la teneur en azote total (NTK) ont été déterminés sur les échantillons de digestats issus des trois productions. Ainsi, le pH a été mesuré avec un pH-mètre numérique (Consort P107, Belgique) selon la méthode AOAC (1990). Le dosage de la DCO a été réalisé selon la norme française

T90-101. Pour la mesure de la DBO, c'est la méthode manométrique basée sur le principe du respiromètre de WARBURG au cours duquel la respiration de la biomasse est directement mesurée par un OXITOP, qui a été utilisée. Le dosage du COT dans les échantillons a été effectué selon la norme française T90-102. Quant à la détermination de la teneur en azote total (NTK), la norme AFNOR NF T90-015 a été suivie.

Dosage des minéraux

Les éléments minéraux dosés comprenaient le phosphore (P), le potassium (K), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le mercure (Hg), le chrome (Cr), l'arsenic (As), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni). Les teneurs en ces éléments minéraux ont été déterminées suite à une analyse par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS) (Coulibaly et al., 2023). Les résultats étaient obtenus directement avec le logiciel et calculés à l'aide d'une régression linéaire de la réponse des étalons.

Analyses microbiologiques

L'analyse microbiologique a consisté à la recherche et au dénombrement des Salmonelles, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Bacillus cereus*, coliformes totaux, *Staphylococcus aureus* et des aérobies sulfito-réducteurs (ASR). Des méthodes conventionnelles ont été utilisées pour ces analyses.

Analyses statistiques

L'exploitation statistique des résultats a été effectuée à l'aide du logiciel STATISTICA 7.1. L'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur et le test de LSD de Fisher ont été réalisés pour comparer les moyennes des variables analysées. Les différences sont considérées significatives pour les valeurs de $p < 0,05$. Par ailleurs, toutes les mesures ont été répétées trois fois. Pour l'étude des différenciations entre les digestats issus de trois productions, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée en prenant en compte l'ensemble des paramètres physicochimiques et microbiologiques déterminés.



Figure 1: Echantillons de digestats.

P1 : Echantillon de digestat issu d'une première production et recueilli après un mois de fonctionnement ; P2 : Echantillon de digestat issu d'une deuxième production et recueilli après deux mois de fonctionnement ; P3 : Echantillon de digestat issu d'une troisième production et recueilli après trois mois de fonctionnement.

RESULTATS

Composition physicochimique des digestats

L'analyse statistique a montré que les valeurs du pH et de DCO restent statistiquement identiques pour les trois échantillons de digestat (Tableau 1). Les valeurs du pH ont oscillé de $8,28 \pm 0,05$ pour Production 1 (P1) à $8,62 \pm 0,47$ (Production 3 (P3)) avec une moyenne d'environ $8,42 \pm 0,18$. Celles du DCO sont comprises entre $165,30 \pm 58,26$ mg O₂/L (P3) et $228,87 \pm 0,05$ mg O₂/L (P1), avec une valeur moyenne de $207,68 \pm 60,64$ mg O₂/L.

Quant aux DBO, COT et NTK, les analyses statistiques ont révélé une différence significative entre les trois productions. Les valeurs de DBO ont varié entre $27,33 \pm 0,76$ (P3) et $84,5 \pm 0,5$ mg O₂/L pour Production 2 (P2) avec une moyenne de $58,83 \pm 29,02$ mg O₂/L. Celles du COT ont oscillé de $18,84 \pm 0,02$ (P2) à $61 \pm 0,01$ mg/L (P1) avec une moyenne de $35,81 \pm 22,25$ mg/L. Les valeurs de NTK sont comprises entre $0,8 \pm 0,01$ et $2,2 \pm 0,01$ g/L avec une moyenne de $1,5$ g/L.

Par ailleurs, les teneurs en phosphore ont varié de $0,326 \pm 0,002$ g/L (P3) à $1,157 \pm 0,003$ (P1) avec une moyenne de $0,738 \pm 0,415$ g/L. Cette variation a été révélée comme significative ($p < 0,05$) par l'analyse statistique. Il en est de même pour la teneur en potassium des échantillons de digestats. Avec une moyenne de $1,65 \pm 0,6$ g/L, les valeurs du potassium ont varié significativement entre $0,99 \pm 0,01$ (P1) et $2,16 \pm 0,01$ g/L (P3). Pour ces digestats, le rapport C/N est compris entre $0,019 \pm 0,001$ (P3) et $0,027 \pm 0,001$ (P1). Ces rapports sont tous inférieurs à 8 (Tableau 1).

Composition en éléments traces métalliques

Les teneurs en éléments traces métalliques sont consignées dans le Tableau 2. L'analyse statistique a révélé une différence significative entre les concentrations en fer des digestats produits. Les valeurs sont comprises entre $7,814 \pm 0,004$ (Production 3) et $23,707 \pm 0,003$ mg/L (Production 1). Tout comme pour le fer, les concentrations en chrome, mercure, arsenic, cadmium, nickel, cuivre, zinc et en plomb ont varié significativement d'une

production à l'autre. Les valeurs étaient comprises entre $0,014 \pm 0,001$ et $0,026 \pm 0,001$ pour le chrome, entre $0,002 \pm 0,001$ et $0,003 \pm 0,002$ pour le mercure, entre $0,011 \pm 0,001$ et $0,033 \pm 0,001$ pour l'arsenic, entre $0,005 \pm 0,001$ et $0,023 \pm 0,001$ pour le cadmium, entre $0,016 \pm 0,002$ et $0,043 \pm 0,004$ mg/L pour le nickel, entre $0,337 \pm 0,002$ et $0,906 \pm 0,020$ mg/L pour le cuivre, et entre $0,853 \pm 0,003$ et $3,190 \pm 0,001$ mg/L pour le zinc. Au niveau du plomb, les teneurs ont oscillé entre $0,010 \pm 0,001$ mg/L et $0,041 \pm 0,001$ mg/L. Par ailleurs, les teneurs de ces éléments traces métalliques étaient conformes à la norme NFU 44-051.

Caractéristiques microbiologiques des digestats

Les échantillons de digestats issus des trois productions analysées renfermaient des coliformes totaux ($1,3 \times 10^8$ - $1,5 \times 10^8$ UFC/mL), des *Staphylococcus aureus* ($2,4 \times 10^8$ - $2,6 \times 10^8$ UFC/mL) et des *Bacillus cereus* ($1,4 \times 10^8$ - $1,6 \times 10^8$ UFC/mL) (Tableau 3). Par ailleurs, la recherche et le dénombrement des microorganismes effectués sur ces échantillons de digestat ont révélé une absence de *Salmonella* sp., d'*E. Coli*, *Clostridium perfringens* et des Anaérobies Sulfito-Réducteurs.

Différenciation entre les digestats issus de trois productions successives

L'analyse du cercle de corrélation entre les variables caractérisant les digestats montre que les paramètres microbiologiques (*Bacillus cereus*, coliformes, Staphylocoques), le pH, les taux de plomb, de cuivre, de chrome, de mercure, d'arsenic, de cadmium, de phosphore, de potassium, de zinc, de fer, de COT, la DCO et le rapport C/N contribuent significativement à la composante 1. Pour la composante 2, ce sont les variables DBO, taux de nickel et taux d'azote qui y contribuaient significativement (Figure 2). Par ailleurs, les trois productions analysées ont été visualisées dans espace plan (Figure 3). A l'analyse, cette représentation dans le plan F1-F2 prend en compte 100% des différenciations entre les digestats issus des trois productions. Dans ce plan, les productions sont bien distinctes. La production 1 est caractérisée par les taux d'azote, de plomb, de cuivre et de COT élevés. La production 2 se différencie par la DBO élevée. Pour le digestat issu de la production 3, le taux de potassium, le taux de nickel, le pH et les charges de coliformes élevés le caractérisent.

Tableau 1 : Composition physicochimique de trois productions successives de digestat.

Paramètres	Production 1	Production 2	Production 3	MOYENNE
pH	$8,28 \pm 0,05^a$	$8,37 \pm 0,30^a$	$8,62 \pm 0,47^a$	$8,42 \pm 0,18$
DCO (mg O ₂ /L)	$228,87 \pm 38,14^a$	$228,87 \pm 76,29^a$	$165,30 \pm 58,26^a$	$207,68 \pm 60,64$
DBO (mg O ₂ /L)	$64,67 \pm 0,58^a$	$84,5 \pm 0,5^b$	$27,33 \pm 0,76^c$	$58,83 \pm 29,02$
COT (mg/L)	$61 \pm 0,01^a$	$18,84 \pm 0,02^b$	$27,58 \pm 0,01^c$	$35,81 \pm 22,25$
NTK (g/L)	$2,2 \pm 0,01^a$	$0,8 \pm 0,01^b$	$1,4 \pm 0,01^c$	$1,5 \pm 0,07$
Phosphore (g/L)	$1,157 \pm 0,003^a$	$0,73 \pm 0,002^b$	$0,326 \pm 0,002^c$	$0,738 \pm 0,415$
Potassium (g/L)	$0,99 \pm 0,01^a$	$0,178 \pm 0,03^b$	$2,16 \pm 0,01^c$	$1,65 \pm 0,6$
C/N	$0,027 \pm 0,001^a$	$0,022 \pm 0,001^b$	$0,019 \pm 0,001^c$	$0,023 \pm 0,004$

Les valeurs portant les mêmes lettres sur la même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (Test LSD de Fisher). DCO : Demande chimique en oxygène ; DBO : Demande biochimique en oxygène ; COT : Carbone organique total ; NTK : Azote total ; C/N : Rapport carbone/azote.

Tableau 2 : Composition en éléments traces métalliques de trois productions successives de digestat.

Paramètres (mg/L)	Production 1	Production 2	Production 3	Moyenne	NORME NFU 44-051.
Fer	23,707 ± 0,003 ^a	16,103 ± 0,002 ^b	7,814 ± 0,004 ^c	15,875 ± 7,945	-
Chrome	0,026 ± 0,001 ^a	0,021 ± 0,001 ^b	0,014 ± 0,001 ^c	0,020 ± 0,006	< 120 mg/kg MS
Mercure	0,002 ± 0,001 ^a	0,003 ± 0,001 ^b	0,003 ± 0,002 ^c	0,003 ± 0,001	<2 mg/kg
Arsenic	0,033 ± 0,00 ^a	0,021 ± 0,001 ^b	0,011 ± 0,001 ^c	0,021 ± 0,01	< 18 mg/kg MS
Cadmium	0,023 ± 0,001 ^a	0,014 ± 0,001 ^b	0,005 ± 0,001 ^c	0,014 ± 0,008	< 3 mg/kg MS
Nickel	0,024 ± 0,001 ^a	0,016 ± 0,002 ^b	0,043 ± 0,004 ^c	0,028 ± 0,014	< 60 mg/kg MS
Cuivre	0,906 ± 0,020 ^a	0,337 ± 0,002 ^b	0,465 ± 0,002 ^c	0,569 ± 0,298	< 300 mg/kg MS
Zinc	3,190 ± 0,001 ^a	2,059 ± 0,001 ^b	0,853 ± 0,003 ^c	2,034 ± 1,168	< 600 mg/kg MS
Plomb	0,041 ± 0,001 ^a	0,010 ± 0,001 ^b	0,020 ± 0,001 ^c	0,024 ± 0,015	< 180 mg/kg MS

Les valeurs portant les mêmes lettres sur la même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (Test LSD de Fisher). MS : Matière sèche.

Tableau 3 : Charges microbiennes des digestats issus de la co-digestion d'effluents de manioc, d'urine humaine et de bouse de vache de trois productions successives.

Germes	Résultat en UFC/mL				Normes digestat
	Production 1	Production 2	Production 3	Moyenne	
Coliformes totaux à 37°C/24 h	1,3 x 10 ⁸	1,4 x 10 ⁸	1,5 x 10 ⁸	1,4 x 10 ⁸	<10 ³ UFC/mL
<i>E. coli</i> à 44°C/24 h	0	0	0	0	<5.10 ³ UFC/mL
<i>Salmonella</i> sp. à 37°C/24 h	0	0	0	0	Absence dans 25 g
<i>Staphylococcus aureus</i> à 37°C/24 h	2,6 x 10 ⁸	2,5 x 10 ⁸	2,4 x 10 ⁸	2,5 x 10 ⁸	
<i>Bacillus cereus</i> à 37°C/24 h	1,4 x 10 ⁸	1,6 x 10 ⁸	1,6 x 10 ⁸	1,53 x 10 ⁸	
<i>Clostridium perfringens</i> à 37°C/24 h	0	0	0	0	
ASR à 46°C/24 h	0	0	0	0	

UFC/mL : Unité Formant Colonie par millilitre ; ASR : Anaérobie Sulfite-Réducteurs.

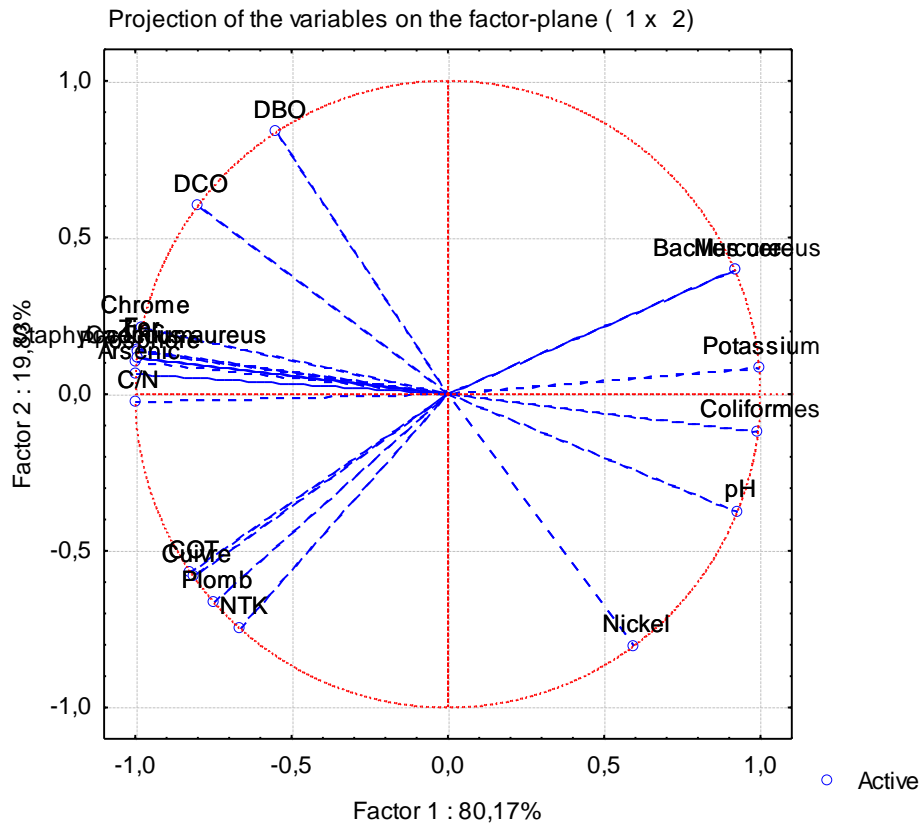


Figure 2 : Cercle de corrélation des variables caractérisant les digestats produits par ACP.

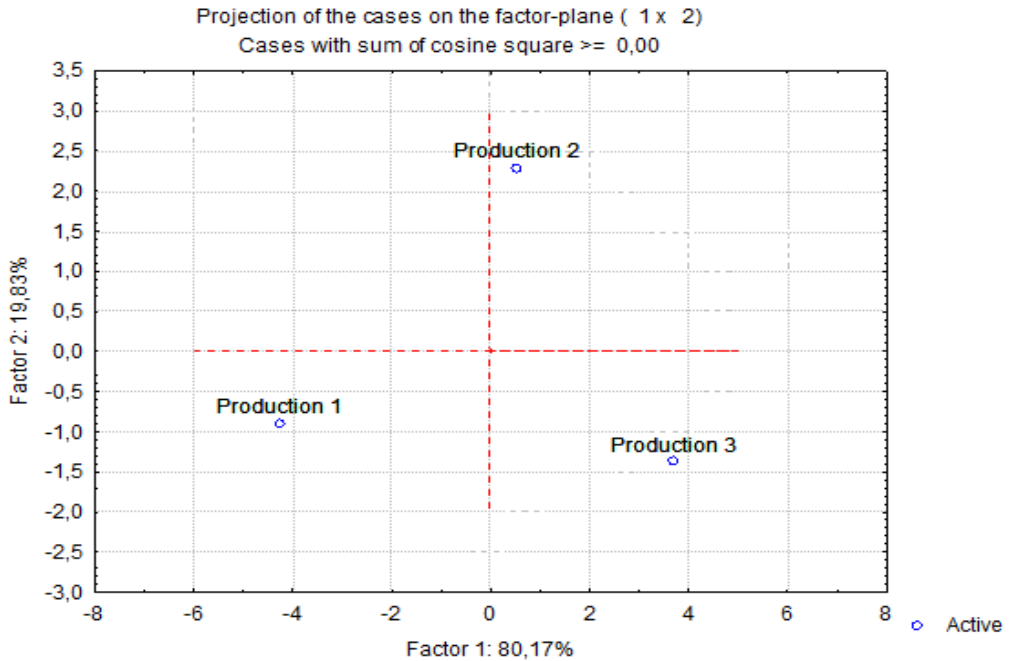


Figure 3 : Représentation des productions de digestat dans le plan F1 x F2 par ACP.

DISCUSSION

La détermination de la valeur agronomique d'un digestat est une importante étape pour sa valorisation en agriculture. Cela passe par sa caractérisation physicochimique et l'évaluation de son innocuité. C'est donc à cette fin que certains paramètres entre autres le pH, le COT, la DCO, la DBO, l'azote total, le potassium et le phosphore ont été déterminés dans des échantillons de digestats. Généralement, le pH des digestats est compris entre 6,5 et 8,5 (ADEME, 2011 ; Tremier et al., 2014 ; Tampio et al., 2016). Dans la présente étude, les valeurs de pH enregistrées pour les digestats issus des différentes productions se situent bien dans cette gamme. Selon Mosquera et al. (2010), un fertilisant dont le pH est proche de la neutralité est idéal pour baisser l'alcalinité des sols, favorisant ainsi l'assimilation du calcium et du magnésium par les plantes.

Par ailleurs, l'analyse statistique a révélé une variation significative des teneurs en COT entre les productions. Les valeurs moyennes de ce paramètre étaient largement inférieures à celles de la littérature (10 à 354 g C/L), rapportées par Reibel et al. (2018). Cette différence serait due à une importante perte de la quantité de carbone sous forme de biogaz au cours de la méthanisation (Tambone et al., 2009 ; Reibel et al., 2018). En effet, la méthanisation est un processus de dégradation de la matière organique. Aussi, de nombreux facteurs dont la nature des intrants, le temps de séjour et la technologie employée ont une influence sur le taux de dégradation de la matière organique (Carton et Bulcke, 2021). En outre, des indications sur la biodégradabilité des digestats produits ont été recherchées à travers la détermination de la DCO et la DBO. A ce propos, les valeurs enregistrées dans cette étude sont largement inférieures à celles respectives de 7290 mg/L et 2916 mg/L rapportées par Kpata-Konan et al. (2019) qui produisaient du digestat selon un processus discontinu. Les faibles valeurs observées seraient dues à une différence au niveau du procédé de méthanisation des effluents notamment le dispositif, le mode de fonctionnement et le temps de séjour du substrat dans les digesteurs. Aussi, ces

différences de valeurs peuvent être dues à l'activité des microorganismes présents dans le digestat. Le rapport moyen de DCO/DBO proche de 3 montre bien que les digestats produits sont biodégradables (IRE, 2007).

Par ailleurs, ces digestats contiennent des matières fertilisantes comme l'azote dont les teneurs étaient comprises entre les valeurs de 1,10 et 240 g/kg, rapportées par ADEME (2011). Les teneurs en azote total varient selon la nature et le mélange des intrants. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les digestats provenant des lisiers de porc et des sous-produits animaux, tandis que les concentrations les plus faibles sont issues de la méthanisation des biodéchets (ADEME, 2011). Avec leur teneur moyenne en azote de 1,5 g/L, les digestats produits peuvent être utilisés en agriculture. Aussi, le rapport C/N inférieur à 8, permet de classer ces digestats dans la catégorie de fertilisants de type II selon la Directive Nitrate (91/676/CEE). Ainsi, l'azote libéré sera utilisable très rapidement par les cultures.

Outre l'azote, d'autres éléments fertilisants sont indispensables à la plante. C'est le cas du phosphore qui agit sur le développement des racines et intervient dans la multiplication cellulaire (GARONNE, 2021). Les teneurs en phosphore des digestats analysés sont accord avec celles comprises entre 0,5 et 50 g de phosphore /kg de MS rapportées par SOLAGRO-IRSTEA (2015) qui travaillaient sur les digestats issus de biodéchets et de déjections animales. En plus de l'azote et du phosphore, les digestats renferment d'autres matières fertilisantes notamment le potassium avec une valeur moyenne de 1,65 g/L. Ces valeurs sont en accord avec celles indiquées par Müller et Möller (2012), qui ont révélé qu'un digestat ayant une concentration en potassium comprise entre 1,5 et 11,5 g/L est idéal pour être utilisé comme engrais biologique.

A côté de ces matières fertilisantes, l'innocuité des digestats a été appréciée entre autres à travers la quantification des éléments traces métalliques (ETM). Le dosage de ces ETM dans les digestats qui seront par la suite épandus est indispensable puisqu'ils sont

d'importants contaminants d'écosystèmes et de chaînes alimentaires (Franconi et al., 2001 ; Yé et al., 2020). Selon ces auteurs, les fortes concentrations d'ETM entraînent des phénomènes de phytotoxicité chez les plantes, ont des effets négatifs sur la flore et la faune du sol et contaminent l'eau. Les problèmes liés aux ETM sont bien documentés (Dan-Badjo et al., 2014 ; Tremier et al., 2014 ; Fares et Sédaira, 2021 ; Dossou et al., 2022). Fort heureusement, dans la présente étude, les valeurs moyennes enregistrées dans les digestats sont conformes à la norme NF U 44-051 homologuée par AFNOR sur les ETM.

L'innocuité des digestats a été appréciée également par la détermination des caractéristiques microbiologiques. Pour celles-ci, les charges moyennes des germes inclus dans les digestats doivent être inférieures aux valeurs limites en microorganismes d'intérêt sanitaire. L'absence de germes pathogènes ou à potentialité pathogène (Salmonelles, *E. coli*, *Clostridium perfringens* et ASR) est donc un gage d'innocuité des digestats produits. Toutefois, des coliformes totaux, des *Bacillus cereus* et des *Staphylococcus aureus* y ont été dénombrés. Il est bien admis que les charges en microorganismes des digestats sont dépendantes des matières méthanisées et des conditions de méthanisation (Besson, 2010 ; ADEME, 2011). Aussi, selon Cuny (2015) une recontamination par des pathogènes au cours du stockage pourrait expliquer les charges de microorganismes dénombrés. En outre, il a été révélé que d'une production à l'autre, certaines caractéristiques du digestat varient. Cela peut s'expliquer par une variation dans la composition des matières méthanisées (ADEME, 2011). Toutefois, ces variations restent dans les limites recommandées. Au regard des paramètres microbiologiques globalement satisfaisants, des teneurs en ETM conformes aux normes et de la présence de matières fertilisantes, l'épandage des digestats dans des champs sous forme d'engrais biologique peut être envisagé.

Conclusion

Cette étude a été menée en vue de déterminer les caractéristiques

physicochimiques et microbiologiques des digestats issus de la digestion anaérobie des effluents de manioc pour une utilisation éventuelle sous forme d'engrais biologique. Il ressort de l'étude que les digestats ont un pH moyen de $8,42 \pm 0,18$, une DCO de $207,68 \pm 60,64$ mg O₂/L, une DBO de $58,83 \pm 29,02$ mg O₂/L et un COT de $35,81 \pm 22,25$ mg/L. Ils renferment également de l'azote (1,5 g/L), du phosphore (0,738 g/L) et du potassium (1,6 g/L). Des éléments traces métalliques ont été quantifiés avec des valeurs moyennes conformes à la réglementation. En outre, les analyses microbiologiques des digestats ont montré l'absence de germes pathogènes tels que *E. coli*, *Salmonella* sp, *Clostridium perfringens*, des ASR. Des coliformes totaux ($1,4 \times 10^8$ UFC/mL), *Staphylococcus aureus* ($2,5 \times 10^8$ UFC/mL) et *Bacillus cereus* ($1,53 \times 10^8$ UFC/mL) y ont été dénombrés. Au regard des valeurs observées et du rapport C/N < 8, le digestat liquide issu de la digestion anaérobie des effluents de manioc est classé comme un fertilisant de type II et présente des potentialités pour un épandage dans les cultures. Pour une meilleure utilisation dans la culture du manioc, la dose optimale d'épandage devra être déterminée.

CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Les auteurs YJLFO, ACK, NEK et NBY ont contribué à la rédaction, à la lecture et à la correction du manuscrit. YJLFO a collecté les données et produit l'ossature du document. ACK a traité les données. NEK et NBY ont contribué à l'interprétation des résultats.

REFERENCES

ADEME. 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Rapport final réalisée par RITTMO Agroenvironnement, Uteam, FIBL, INERIS, LDAR pour le compte de l'ADEME et le Ministère de

- l'Agriculture. Marché ADEME n° 0906C0053, p. 250.
- AOAC. 1990. *Official Methods of Analysis* (15th Edition). Association of Official Analytical Chemist: Washington DC.
- Besson M. 2010. La méthanisation en zone AOC Savoyardes, Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires liés à l'épandage de digestat. Rapport de stage, Licence Professionnelle COMESA, Université de Savoie, p. 37.
- Carton S, Bulcke Q. 2021. L'utilisation des digestats en agriculture – Les bonnes pratiques d'utilisation. Guide. ENGIE-AgroParisTech, France, p. 25.
- Coulibaly M, Yoboue BA, Soro D, Assidjo NE. 2023. Assessment Of Heavy Metals Content In Fresh And Dried Pepper Grown In Côte d'Ivoire. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, **17**(7) : 06-12. DOI: 10.9790/2402-1707010612
- Cuny A. 2015. Etude de la dynamique de bactéries pathogènes lors du stockage de produits résiduels organiques issus de la méthanisation : influence de déterminants biotiques (activité microbienne) et de la biodisponibilité de la matière organique. Master BioMANE, 2ème année, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE), INRA, Narbonne (France), p. 55.
- Dan-Badjo TA, Tidjani AD, Idder T, Guero Y, Lamso DN, Matsallabi A, Ambouta KJM, Feidt C, Sterckeman T, Echevarria G. 2014. Diagnostic de la contamination des eaux par les éléments traces métalliques dans la zone aurifère de Komabangou – Tillabéri, Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **8**(6): 2849-2857. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.41>
- Dossou D, Bokossa KHJ, Adanlokonon SAE, Zounon Y, Adanlokonon IMS, Johnson CR, Fiogbe DE, Edorth P. 2022. Evaluation de la contamination métallique des sédiments et des crabes (*Callinectes amnicola*) du Lac Ahémé au sud Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **16**(5): 2424-2435. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v16i5.47>
- Doublet S, Leclerc B, Couturier C, Berger S. 2004. La qualité agronomique des digestats. Rapport final SOLAGRO. Etude réalisée pour l'ADEME : C/568 - N°2 – 12/04, p. 180.
- Fares R, Sédaira L. 2021. Stress abiotique sur *Atriplex halimus* L : Effet des métaux lourds et caractérisation des biomarqueurs. Mémoire Master, Ecophysiologie végétale, Université Larbi Tébessi –Tébessa, République Algérienne Démocratique et Populaire, p. 119.
- Franconi A, Cordeau E, Poitevin J, Camard J-P, Faytre L. 2001. La pollution des sols : impact sur l'environnement et la santé. *Note Rapide sur l'Environnement et la Santé*, **286**(1) : 1-6. Disponible sur : <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/la-pollution-des-sols-impact-sur-lenvironnement-et-la-sante/>
- GARONNE. 2021. Valorisation agronomique du digestat : étude préalable à l'épandage. GARONNE/BIOGAZ, p. 92.
- IRE. 2007. Pollution organique. Eau. Edition DRIRE/IRE, Nord-Pas-de Calais (France): 190-195.
- Kpata-Konan NE, Konan KF, Kouamé KM, Kouamé YF, Gnagne T, Tano K. 2011. Optimisation de la biométhanisation des effluents de manioc issus de la filière de fabrication de l'attiéké (semoule de manioc). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **5**(6): 2330-2342. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i6.13>
- Kpata-Konan NE, Kouamé YF, Kouamé KM, Konan KF. 2019. Characterization of Digestats from Anaerobic Co-Digestion of Manioc Effluent, Human Urine and Co Dung. *Journal of Water Resource and Protection*, **11**(6): 777-788. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.116047>.
- Miche JC. 1973. Amélioration des caractéristiques technologiques et nutritionnelles de quelques végétaux

- alimentaires. In : Réunion des Sélectionneurs de l'IRAT. Nogent-sur-Marne : GERDAT-IRAT, France, p. 10.
- Mosquera-Losada MR, Munoz-Ferreiro N, Rigueiro-Rodriguez A. 2010. Agronomic caractérisation of différent types of sexage slug: Policy implications. *Waste Manage*, **30**(3): 492-503. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.021>
- Müller T, Möller K. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestat nutrient availability and crop growth. *Engineering in Life Sciences*, **3**: 242-257. DOI : <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>
- NITIDAE. 2020. Valorisation du digestat liquide issu de la biodigestion de jus de manioc. https://www.nitidae.org/files/6ff5049c/rapport_de_valorisation_du_digestat_liquide_issu_de_la_biodigestion_de_jus_de_manioc.pdf.
- Reibel A, Geres, Leclerc B. 2018. Valorisation agricole des digestats : Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ? Revue de littérature. La méthanisation en Provence – Alpes – Côte d'azur, p. 63. Disponible sur : https://www.geres.eu/wp-content/uploads/2019/10/ARE1805.201.ENV_.VALOMOII.Etude_Digestats_VF.pdf
- SOLAGRO-IRSTEA. 2015. Etat de l'art des digestats et de leurs procédés de post-traitement. Rapport final février 2012-juin 2015, p. 76. Disponible sur : https://methasynergie.fr/wp-content/uploads/2020/03/Etat-de-lart-des-digestats-et-post-traitements_2015.pdf
- Tambone F, Genevini P, D'Imporzano G, Adani F. 2009. Assessing amendment properties of digestat by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresource Technology*, **100**(12): 3140-3142. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.012>
- Tampio E, Marttinen S, Rintala J. 2016. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestat liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, **125**: 22–32. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.127>
- Tremier A, Buffet J, Picard S, Saint-Cast P. 2014. Caractérisation Physico Chimique Des Digestats Bruts Solides Et Liquides Et Stabilité Biologique Résiduelle. DIVA Livrables Tâche 3a. IRESTEA RENNES 17 avenue de Cucillé, ANR, p. 96. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/334530705/DIVA-Livrables-Tache-3a-Characterisation-Physico-Chimique-Des-Digestats-Bruts-Solides-Et-Liquides-Et-Stabilite-Biologique-Residuelle>.
- Yé L, Lompo JPD, Sako A, Nacro BH. 2020. Evaluation des teneurs en éléments traces métalliques des sols soumis à l'apport des déchets urbains solides. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **14**(9): 3361-3371. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v14i9.31>

RESUME

Les effluents de manioc sont des déchets liquides, riches en matière organique, présentant une grande toxicité et découlant le plus souvent des fabriques d'attiéké. Ils peuvent être transformés en biogaz dans un processus de méthanisation en anaérobie qui libère en plus un autre déchet, le digestat. Ce dernier mérite d'être valorisé. Dans un contexte d'économie circulaire, l'utilisation du digestat sous forme de biofertilisant dans la production de racines de manioc, aptes à la transformation en attiéké prisé par les consommateurs serait une contribution significative. Le présent travail a pour objectif général de valoriser le digestat de manioc produit avec un procédé de méthanisation en fonctionnement continu dans la production de manioc de haute qualité nutritionnelle, technologique et organoleptique. A cet effet, les caractéristiques physicochimiques, microbiologiques et l'innocuité du digestat produit ont été déterminées en vue de son éventuelle utilisation dans la culture du manioc. Pour une utilisation efficace, la dose optimale d'épandage du digestat a été déterminée par la méthodologie des surfaces de réponse. Par ailleurs, une expérimentation au champ a été effectuée avec le digestat en utilisant le dosage optimal et un manioc de variété Yacé. Les effets du digestat utilisé ont été déterminés sur les caractéristiques physicochimiques des racines récoltées après 12 mois de plantation. De plus, l'aptitude des racines à être transformées en *attiéké* apprécié par les consommateurs a été évaluée. Les données collectées ont subi des traitements statistiques. Les résultats de la caractérisation du digestat ont révélé qu'il renferme des matières fertilisantes et a un profil microbiologique sûr. Le digestat a présenté en outre une innocuité au regard de ses teneurs en éléments traces métalliques. Pour une utilisation efficace du digestat dans la culture du manioc, les conditions optimales d'épandage déterminées sont un taux de dilution de 75 % et un volume de 1,25 L à répandre par plant. Dans ces conditions, un rendement maximal de 50,24 t/ha de la variété Yacé a été obtenu. Relativement aux effets du digestat sur la composition chimique des racines récoltées, les résultats ont révélé une influence significative sur certains paramètres. Ainsi, le digestat a permis d'avoir des racines de manioc ayant les teneurs en glucides totaux, en macroéléments (K, Ca, Na) et en antioxydants (polyphénols et flavonoïdes totaux) plus élevées que celles des racines témoins. Par ailleurs, la caractérisation physicochimique des échantillons d'*attiéké* dérivant de ces racines a révélé des caractéristiques globalement identiques entre ces *attiékés*. Toutefois, ils diffèrent par leurs teneurs en fibres, en lipides, en sucres totaux et par leur valeur énergétique. L'*attiéké* issu des racines de manioc traité avec le digestat dosé à 75 % a enregistré le taux de fibres le plus bas et a été globalement plus apprécié par les consommateurs en comparaison à l'*attiéké* témoin. L'utilisation du digestat issu de la méthanisation d'effluent pour la production de racines de manioc capables d'être transformées en *attiéké* de qualité nutritionnelle améliorée et aux propriétés organoleptiques appréciées par les populations est une importante voie de valorisation qui cadre bien avec le concept d'économie circulaire.

Mots clés : Attiéké, digestat, effluent, manioc, méthanisation, optimisation, rendement.

Abstract

Cassava effluents are liquid wastes rich in organic matter, exhibiting significant toxicity, and are most commonly derived from attiéké production facilities. These effluents can be converted into biogas through an anaerobic methanation process, which also yields another by-product, digestate. The latter merits valorisation. Within the framework of a circular economy, the utilisation of digestate as a biofertiliser in the production of cassava roots suitable for transformation into attiéké, which is highly esteemed by consumers would constitute a significant contribution. The aim of this study is to enhance the value of cassava digestate produced through a continuous methanation process in the cultivation of cassava with high nutritional, technological, and organoleptic quality. To achieve this, the physicochemical and microbiological characteristics, as well as the safety of the produced digestate, have been assessed for its potential use in cassava cultivation. For efficient application, the optimal dosage for spreading the digestate was determined using response surface methodology. Additionally, a field experiment was conducted employing the optimal dosage of digestate on Yacé cassava variety. The effects of the applied digestate were evaluated on the physicochemical characteristics of the roots harvested after twelve months of planting. Furthermore, the suitability of the roots for transformation into consumer-appreciated attiéké was assessed. The collected data underwent statistical analysis. The characterisation results of the digestate revealed that it contains fertilising materials and possesses a safe microbiological profile. Moreover, the digestate demonstrated safety concerning its trace metal content. For the effective utilisation of digestate in cassava cultivation, the optimal application conditions determined are a dilution rate of 75% and a volume of 1.25 L to be applied per plant. Under these conditions, a maximum yield of 50.24 t/ha was achieved for the Yacé variety. Regarding the effects of the digestate on the chemical composition of the harvested roots, the results indicated a significant influence on certain parameters. Thus, the digestate resulted in cassava roots with higher total carbohydrate content, macroelements (K, Ca, Na), and antioxidants (total polyphenols and flavonoids) compared to the control roots. Additionally, the physicochemical characterisation of the attiéké samples derived from these roots revealed generally similar characteristics among the attiékés. However, they differed in their fibre, lipid, total sugar content, and energy value. The attiéké produced from cassava roots treated with digestate at a 75% dosage recorded the lowest fibre content and was overall more favourably received by consumers in comparison to the control attiéké. The utilisation of digestate from the methanation of effluents for the production of cassava roots capable of being transformed into attiéké with enhanced nutritional quality and organoleptic properties appreciated by the populace represents an important avenue for valorisation that aligns well with the concept of a circular economy.

Keywords: Attiéké, digestate, effluent, cassava, methanation, optimisation, yield.