



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 : 2018-2019

N° D'ORDRE : 017

CANDIDAT

Nom : KOUAME

Prénom : KOUASSI THIEGBA

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et foresterie tropicale

Spécialité : Agrophysiologie

**Effets de biofertilisants à base d'*Azolla* et de
composts sur la culture de tomate [*Solanum
lycopersicum*, L. (Solanacée) variété Boomerang
F1] au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire**

JURY

Président : M. KONE Tidiani, Professeur Titulaire, Université Jean
Lorougnon Guédé

Directeurs : M. YATTY Kouadio Justin, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Rapporteur : M. KOUAME Kan Benjamin, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé

Examineurs : M. BOYE Mambé Auguste-Dénise, Maître de
Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

M. BROU Yao Casimir, Maître de Conférences,
Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

Soutenue publiquement
le : 27 Juin 2020

TABLE DES MATIERES

	Pages
DEDICACE	vi
REMERCIEMENTS	vii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	x
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ANNEXES	xiii
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	5
CHAPITRE 1 : TOMATE	6
1.1. Origine et distribution	6
1.2. Taxonomie et systématique	6
1.3. Caractéristiques botaniques	7
1.4. Biologie et écologie de la tomate	10
1.5. Pathologie liée à la culture de la tomate	11
1.6. Importance et atouts de la tomate	11
CHAPITRE 2 : FERTILISANTS	13
2.1. Définition.....	13
2.2. Biofertilisants.....	13
2.2.1. Biofertilisants d'origine animale	14
2.2.1.1. Fumier de ferme	14
2.2.1.2. Purin	14
2.2.1.3. Lisier	14
2.2.2. Biofertilisants d'origine végétale.....	14
2.2.2.1. Déchets agroalimentaires.....	15
2.2.2.2. Engrais verts.....	15
2.2.3. Biofertilisants à base des champignons mycorhiziens arbusculaires	15
2.2.4. Biofertilisants à base de bactéries.....	15
2.2.4.1. Rhizobactéries	15
2.2.4.2. Bactéries solubilisatrices de silicate	16

2.2.4.3. Bactéries fixatrices d'azote.....	16
2.2.5. <i>Azolla sp</i>	17
2.2.5.1. Origine et distribution de <i>Azolla sp</i>	17
2.2.5.2. Taxonomie et systématique.....	18
2.2.5.3. Caractéristiques botaniques de <i>Azolla sp</i>	19
2.2.5.4. Biologie et écologie de <i>Azolla sp</i>	19
2.2.5.5. Importance et atouts.....	22
2.2.6. Cyanobactérie <i>Anabaena azollae</i>	23
2.3. Compost d'origine végétal ou animal.....	23
2.3.1. Définition.....	23
2.3.2. Différents types de compostage.....	25
2.3.3. Buts et avantages des composts sur les cultures.....	25
2.3.4. Technique de préparation du compost.....	26
2.4. Fertilisants chimiques.....	27
2.4.1. Définition.....	27
2.4.2. Engrais azotés.....	27
2.4.2.1. Engrais nitriques.....	27
2.4.2.2. Engrais ammoniacaux.....	28
2.4.2.3. Engrais ammoniaco-nitrique.....	28
2.4.2.4. Autres formes.....	28
2.4.3. Engrais NPK.....	28
2.4.3.1. Origine et importance du NPK.....	28
2.4.3.2. Formes commercialisées et limites du NPK.....	29
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES.....	31
CHAPITRE 1 : MILIEU D'ETUDE.....	32
1.1. Situation géographique.....	32
1.2. Facteurs abiotiques du département de Daloa.....	32
1.2.1. Climat et température du département.....	32
1.2.2. Hydrographie du département.....	32
1.2.3. Sols du département.....	35
1.3. Facteurs biotiques du département de Daloa.....	35
1.3.1. Végétation du département.....	35
1.3.2. Faune du département.....	35

1.3.3. Population et activités humaines du département de Daloa.....	36
CHAPITRE 2 : MATERIEL.....	37
2.1. Matériel végétal.....	37
2.1.1. Tomate de variété Boomerang F1	37
2.1.2. Fougère <i>Azolla sp</i>	37
2.2. Matériel fertilisant.....	37
2.2.1. Fertilisants organiques	37
2.2.1.1. <i>Azolla caroliniana</i>	37
2.2.1.2. Compost à base de produits organiques	37
2.2.1.3. Déchets de ferme	39
2.2.2. Fertilisants Chimiques	39
CHAPITRE 3 : METHODES	41
3.1. Production de la fougère <i>Azolla</i> (<i>A. caroliniana</i> et <i>A. filiculoides</i>) à l'aide de la bouse de vache et fiente de poulet	41
3.1.1. Préparation des filtrats	41
3.1.1.1. Préparation du filtrat à base de bouse de vache	41
3.1.1.2. Préparation du filtrat à base de fiente de poulet.....	41
3.1.2. Détermination de la composition minérale des filtrats	41
3.1.2.1. Analyse par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA).....	41
3.1.2.2. Analyse par Spectrophotométrie UV visible	43
3.1.3. Culture de <i>Azolla sp</i>	43
3.1.3.1. Echantillonnage des fougères	43
3.1.3.2. Mise en place de la culture	43
3.1.4. Récolte de <i>Azolla sp</i>	44
3.1.5. Masse de <i>Azolla</i> produite	44
3.2. Effet des fertilisants biologiques de <i>Azolla caroliniana</i> et du compost sur la culture de tomate	44
3.2.1. Préparation de <i>Azolla</i> liquide	46
3.2.2. Préparation du compost.....	46
3.2.3. Effets des biofertilisants sur la culture de la tomate en pépinière	46
3.2.3.1. Mise en place de la pépinière	46
3.2.3.2. Paramètres mesurés	49
3.2.4. Effets des biofertilisants sur la culture de la tomate au champ	49

3.2.4.1. Recherche de la dose optimale du fertilisant liquide à base de <i>Azolla sp</i>	49
3.2.4.2. Itinéraire technique de la tomate	52
3.2.4.3. Paramètres évalués	55
3.3. Analyses statistiques des données	60
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	61
CHAPITRE 1 : RESULTATS.....	62
1.1. Effet des déchets de ferme sur la production <i>in vivo</i> de <i>Azolla sp</i>	62
1.1.1. Composition chimique de la bouse de vache et de la fiente de poulet	62
1.1.2. Production de <i>Azolla sp</i> par l'utilisation de déchet de ferme	62
1.2. Effet des fertilisants biologiques sur la production de la tomate	65
1.2.1. Composition chimique de la fougère <i>Azolla caroliniana</i> , du compost et du sol...65	
1.2.2. Effets des biofertilisants sur les paramètres de croissance des plants de tomate en pépinière	65
1.2.2.1. Hauteur des plants	65
1.2.2.2. Diamètre au collet	67
1.2.3. Efficacité des doses de <i>Azolla sp</i> sur la production de la tomate en plein champ.67	
1.2.3.1. Efficacité des doses de <i>Azolla sp</i> sur l'apparition des boutons floraux.....67	
1.2.3.2. Efficacité des doses de <i>Azolla sp</i> sur l'apparition des fleurs épanouies.....67	
1.2.3.3. Efficacité des doses de <i>Azolla sp</i> sur l'apparition des fruits.....69	
1.2.4. Effets des biofertilisants sur les paramètres agronomiques de la tomate en plein champ	69
1.2.4.1. Effets biofertilisants sur les paramètres végétatifs	69
1.2.4.2. Effets des biofertilisants sur les paramètres de rendement	71
1.2.4.3. Effets des biofertilisants sur le rendement de la tomate	74
1.2.5. Effets de la variation saisonnière sur la productivité de la tomate traitée aux fertilisants biologiques	76
1.2.5.1. Effet de la variation saisonnière sur les paramètres de croissance.....76	
1.2.5.2. Effet de la variation saisonnière sur les paramètres de production	77
1.3. Effet des biofertilisants sur la qualité nutritionnelle et organoleptique des fruits de tomate	79
1.3.1. Effet sur la composition physico-chimiques des fruits de tomate	79
1.3.2. Effets sur les paramètres organoleptiques des fruits de tomate.....82	

CHAPITRE 2. DISCUSSION	86
2.1. Effet des déchets de ferme sur la production <i>in vivo</i> de <i>Azolla sp</i>	86
2.2. Effet des substrats de <i>Azolla caroliniana</i> et du compost sur la productivité de la tomate	87
2.3. Effet des différentes fertilisations sur la productivité de la tomate en fonction des saisons	89
2.4. Effet des différentes fertilisations sur la qualité nutritionnelle et organoleptique des fruits de tomate	90
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	93
REFERENCES	96
ANNEXES.....	I
PUBLICATIONS.....	IX
RESUME	

DEDICACE

Je dédie ce mémoire

A ma mère, KOFFI Affoué ;

A mon père, FEU KOUASSI Kouamé ;

Vous êtes ceux qui me donnent le courage d'avancer quand je suis sur le point d'abandonner, ceux pour qui je me bats pour réussir. Vos prières, vos soutiens et vos bénédictions font ma force. Rien ne saurait exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous ne cessez de faire depuis ma naissance. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver, vous accorder la santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

A mon épouse, KONAN Affoué Elisabeth ;

A mon frère, Docteur KOUASSI Lazare ;

A toute ma famille.

Rien ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Vous n'avez jamais cessé de me soutenir, merci pour vos paroles réconfortantes. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je vous porte.

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de ce projet de thèse est l'œuvre de multiples contributions qui méritent notre reconnaissance et bien plus, nos remerciements à tous ceux qui ont permis sa réalisation.

Il s'agit, particulièrement du :

- Professeur TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour avoir autorisé notre inscription en thèse au sein de cette Institution et pour les efforts qu'elle fait quotidiennement en vue de la bonne marche de l'institution ;

- Professeur KONE Tidiani, Professeur Titulaire et Vice-président chargé de la Pédagogie, de la Vie universitaire, de la Recherche et de l'Innovation technologique de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour les efforts consentis dans la formation dans cette Université, et qui a toujours été disponible pour répondre à nos préoccupations au plan académique. Merci Professeur d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse malgré vos nombreuses préoccupations ;

- Docteur AKAFFOU Doffou Selastique, Maître de Conférences, Vice-président chargé de la Planification, de la Programmation et des Relations Extérieures de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour ses encouragements, ses conseils et pour son implication au bien-être des étudiants ;

- Docteur TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences, Directrice de l'UFR Agroforesterie, pour sa disponibilité et ses sages conseils dont nous avons bénéficié durant les années académiques ;

- Professeur KOUADIO Yatty Justin, Professeur Titulaire de Physiologie Végétale à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, Directeur de cette thèse, pour avoir accepté de diriger cette Thèse. Par ailleurs, le Professeur KOUADIO Yatty Justin fut notre enseignant dès notre entrée à l'Université Nangui Abrogoua. Il a guidé nos pas dans l'univers de la recherche scientifique. Au-delà de ces actions bienfaitrices de formateur, le Professeur KOUADIO Yatty Justin est un père, le conseiller qui nous a accompagné durant ce parcours. Cher Maître, nous nous devons ainsi, à juste titre, de vous témoigner notre infinie gratitude et notre déférence.

- Docteur GROGA Noël, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, qui depuis ces cinq dernières années, a toujours répondu favorablement à toutes nos sollicitations. Il a disposé de son temps pour apporter son aide. Le Docteur Grogga a été notre encadreur scientifique depuis le mémoire de Master et pendant la réalisation de cette thèse. Nous garderons toujours un souvenir très vif de ses grandes qualités humaines ;

- Docteur BROU Yao Casimir, Maître de Conférences en Physiologie et Agrotechnologies végétales à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, nous témoignons notre reconnaissance. Merci Docteur ; malgré votre chronogramme chargé, vous n'avez pas hésité à apporter votre expertise pour améliorer la qualité de ce document quand vous avez accepté de faire partie du jury de cette thèse ;

- Docteur KOUAME Kan Benjamin, Maître de Conférences en Biochimie et Technologie des Aliments à l'Université Jean Lorougnon Guédé Daloa, nous disons merci pour ses conseils, son encadrement et aussi pour avoir accepté de faire partie du jury pour l'évaluation de ce travail ;

- Docteur BOYE Mambé Auguste-Dénise, Maître de Conférences en Physiologie Végétale à l'Université Jean Lorougnon Guédé Daloa, nous vous disons merci pour vos conseils et aussi pour avoir accepté de faire partie du jury pour l'évaluation de ce travail ;

- Docteurs SORO Dognimeton, AYOLIE Koutoua Constant et KOUAKOU Kouakou Laurent, Maîtres de Conférences, nous traduisons notre reconnaissance. Merci, Docteurs, pour vos soutiens vos conseils qui nous ont servi tout le long de cette thèse ;

- Docteurs AKEDRIN Tetchi Nicaise, DRO Bernadin et AMON Anoh Denis-Esdras, Maîtres-Assistants à l'Université Jean Lorougnon Guédé Daloa, pour leurs précieux conseils durant les travaux de cette thèse ;

- Docteur SALLA Moreto, Assistant, Enseignant chercheur à l'Université Jean Lorougnon Guédé Daloa, pour ses précieux conseils durant la rédaction de ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi à l'endroit de tous les Enseignants des UFR Agroforesterie et Environnement de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour la qualité de la formation reçue.

Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury, pour l'honneur qu'ils nous accordent en acceptant d'apprécier ce travail.

Nous tenons à remercier le Pasteur KOUADIO André, ses collaborateurs NAYE Arnaud, OBLAY Christian et KOUADIO Marcel et tout le peuple de Dieu.

Nous remercions aussi tous les amis, particulièrement DROH Etienne, KOUASSI Céline, ABO Eugénie, KONAN Yao Bienvenu Aser, KOUADIO Atto Delphin, AMANI Koffi Jean-Arsene, SORO Donafologo Drissa, SORO Baba Guy et OUATTARA Yaya, pour leur disponibilité lors des travaux de terrain et le soutien matériel, financier et spirituel qu'ils nous ont apporté.

Il y a aussi des personnes que nous voulons remercier parce qu'à un moment donné ils ont été un appui. Il s'agit de la famille ZADE, Dr BALLO, Dr DJENE, Mme SORO, Monsieur OUATTARA, ainsi que la famille YAO.

Enfin, nous remercions tous ceux dont les noms n'ont pas pu être cités, mais qui ont contribué à la réussite de ce travail.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

LISTE DES SIGLES

ANADER	: Agence Nationale d'Appui au Développement Rural
AOAC	: Association of Official Analytical Chemists
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FSA	: Faculté des Sciences Agronomiques
MRE	: Ministère des Relations Extérieures
NPK	: Azote, phosphore et potassium

LISTE DES ABREVIATIONS

AC	: <i>Azolla caroliniana</i>
AF	: <i>Azolla filiculoides</i>
Bv	: Bouse de vache
Fp	: Fiente de poulet
M1	: Masse du creuset + prise d'essais
M2	: Masse de l'ensemble après étuvage
MG	: Teneur en matières grasses
PE	: Prise d'essai
Pp	: Planche à production
T0	: Temps des premières observations et mesures
T1	: Temps des deuxièmes observations et mesures
T2	: Temps des troisièmes observations et mesures
T3	: Temps des quatrièmes observations et mesures
T4	: Temps des cinquièmes observations et mesures
T5	: Temps des sixièmes observations et mesures
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé
V_b	: Volume de soude versé
V_a	: Volume du diluant ou eau distillée
V_e	: Volume de l'essai
VE	: Valeur énergétique

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I : Composition en minéraux du filtrat de bouse de vache et de fiente de poulet	63
Tableau II : Quantité de <i>Azolla</i> (<i>A. caroliniana</i> et <i>A. filiculoïdes</i>) produite avec le filtrat de bouse de vache et de fiente de poulet, en fonction du temps	64
Tableau III : Composition et propriété chimique des différents substrats	66
Tableau IV : Variation du diamètre au collet et la hauteur des plants de tomate en pépinière en fonction des fertilisants	66
Tableau V : Variation de la hauteur des plants de tomate en fonction des fertilisants	70
Tableau VI : Variation de la longueur des feuilles de tomate en fonction des fertilisants	72
Tableau VII : Effet des fertilisants sur la ramification des tiges de tomate	72
Tableau VIII : Effet des fertilisants sur le diamètres au collet des tiges de tomate	73
Tableau IX : Influence des fertilisants sur les paramètres de production de tomate	75
Tableau X : Influence de la variation saisonnière sur les paramètres de croissance de la tomate en fonction des fertilisants.....	78
Tableau XI : Influence de la variation saisonnière sur les paramètres de production de la tomate en fonction des fertilisants.....	80
Tableau XII : Caractéristiques physico-chimiques des fruits de tomate en fonction des fertilisants	81
Tableau XIII : Répartition des juges selon leurs appréciations des caractéristiques organoleptiques des fruits des plants de tomate	84

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : Structure de la plante de tomate	8
Figure 2 : Feuille composée imparipennée de tomate	8
Figure 3 : Fleurs de tomate	9
Figure 4 : Frondes de <i>Azolla sp.</i>	20
Figure 5 : Schéma du cycle de reproduction de <i>Azolla sp.</i>	21
Figure 6 : Schéma de développement de la symbiose <i>Azolla sp</i> et <i>Anabaena-azollae</i>	24
Figure 7 : Carte de la zone de l'étude	33
Figure 8 : Diagramme ombrothermique du département de Daloa de 1986 à 2016	34
Figure 9 : Semences de tomate de la variété Boomerang F1	38
Figure 10 : <i>Azolla sp</i> dans un étang	38
Figure 11 : Déchets de ferme	40
Figure 12 : Engrais minéral NPK (SOLEVO)	40
Figure 13 : Schéma simplifié de la préparation du filtrat	42
Figure 14 : Bacs de culture de la fougère <i>Azolla</i>	45
Figure 15 : Récolte de la fougère <i>Azolla</i>	45
Figure 16 : Dispositif de la préparation de <i>Azolla</i> liquide	47
Figure 17 : Compost prêt à être utilisé.....	47
Figure 18 : Dispositif expérimental de la culture de la tomate en pépinière	48
Figure 19 : Dispositif expérimental pour la recherche de la dose optimale du filtrat de <i>Azolla caroliniana</i> sur la production de la tomate.....	51
Figure 20 : Dispositif expérimental d'évaluation des différents traitements sur la production de la tomate.....	53
Figure 21 : Effets de la dose de <i>Azolla caroliniana</i> sur le temps d'apparition des boutons floraux des plants de la tomate	68
Figure 22 : Effets de la dose de <i>Azolla caroliniana</i> sur le temps d'apparition du nombre de fleurs épanouies des plants de la tomate	68
Figure 23 : Effets de la dose de <i>Azolla caroliniana</i> sur le temps d'apparition des fruits de tomate.....	70
Figure 24 : Effet des différents fertilisants sur le temps d'apparition des fleurs	73
Figure 25 : Effet des traitements sur le rendement des fruits de tomate.....	75

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Plants de tomate en alvéole prêt à être repiqués

Annexe 2 : Parcelle expérimentale pour la culture de tomate

Annexe 3 : Mesure des paramètres de croissances de la tomate

Annexe 4 : Amendement des parcelles avec les différents fertilisants

Annexe 5 : Planches de tomate 2 mois après repiquage

Annexe 6 : Quelques matériels utilisés dans le cadre de l'étude

Annexe 7 : Fruits de tomate (Boomerang F1) traités avec les différents fertilisants

Annexe 8 : *Azolla caroliniana* cultivée avec le filtrat de fiente de poulet

Annexe 9 : *Azolla filiculoïdes* cultivée avec le filtrat de fiente de poulet

Annexe 10 : Fiche de notation pour les tests hédoniques



INTRODUCTION

Introduction

Depuis les années 1960, la Côte d'Ivoire a basé son économie sur le binôme café-cacao au détriment des autres cultures (Koffi *et al.*, 2009), notamment les cultures maraîchères. Dans ces dernières décennies, les cultures maraîchères sont devenues une activité agricole contribuant de façon efficace, à la demande alimentaire en milieu urbain et périurbain (Singbo *et al.*, 2004). Parmi ces cultures maraîchères, la culture de la tomate (*Solanum lycopersicum*) constitue une activité lucrative pour de nombreux producteurs. Cette forte ruée vers la culture de la tomate est due à sa richesse en protéine, en vitamine A et C (Hanson *et al.*, 2001), et à son implication dans plusieurs menus alimentaires. Selon les statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), la production mondiale de tomate s'élevait à 177,042 millions de tonnes pour une superficie cultivée de 4,78 millions d'hectares en 2016, soit un rendement moyen de 37 t/ha. Pour satisfaire la demande mondiale en tomate, il faut que la production augmente de 60 % d'ici à 2050 par rapport à celle de 2005-2007 (Alexandratos & Bruinsma, 2012). En Côte d'Ivoire, la production de tomate est en moyenne de 10 t/ha (CNRA, 2016) ; ce qui est insuffisant pour couvrir les besoins de la population galopante qui est estimée à 100 000 tonnes de tomate par an (Soro *et al.*, 2007). Le pays doit donc s'autosuffire en tomate dont la production demeure faible. Cette faible production en Côte d'Ivoire de ce produit pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord par l'appauvrissement des sols cultivables dû à une surexploitation et une mauvaise gestion des terres culturales. Les sols sont cultivés régulièrement par les agriculteurs avec les mêmes cultures. Une des conséquences directes est l'amenuisement des éléments minéraux nécessaires à la fertilisation du sol et l'épanouissement des cultures. Il s'agit notamment de l'Azote, du Phosphore, du Potassium, du Calcium, du Manganèse et du Cuivre (Mario, 2016). En effet, les plantes pour assurer leur croissance normale et maintenir une bonne productivité, utilisent l'Azote (N), le Phosphore (P) et le Potassium (K) en quantité importantes (Lhoussaine, 2000). Ainsi, les quantités d'éléments nutritifs présentes dans le sol déterminent la qualité de la nutrition minérale de la plante et en grande partie son rendement quantitatif (Groga *et al.*, 2018). Pour satisfaire aux besoins alimentaires, le gouvernement adopte des stratégies pour moderniser les exploitations agricoles. Ces stratégies ont pour objectif d'injecter des fonds dans le domaine vivrier, de créer des structures d'encadrements et de commercialisation du vivrier et d'encourager l'utilisation d'intrants agricoles, notamment les engrais chimiques, pour stimuler le rendement des cultures. Ensuite, un autre facteur lié à la faible production de la tomate serait la mauvaise utilisation des intrants agricoles. Car, l'utilisation excessive de ces intrants dans les parcelles agricoles a certes permis une amélioration des rendements agricoles (N'dah, 2012), mais, leurs effets autrefois négligés, sont devenus une source de pollution majeure. En effet,

Introduction

l'utilisation de ces engrais chimiques à long terme entraîne des effets néfastes sur l'environnements, mais aussi sur la production des cultures (Pierre, 1996 ; Grogga *et al.*, 2018). Aussi, à ces facteurs s'ajoute le niveau d'éducation des producteurs de tomate dans notre pays. En effet, la majorité des producteurs de tomate sont analphabètes, ce qui rend difficile la bonne application des conseils liés à leur activité et surtout à l'utilisation des intrants dans leurs parcelles culturales. Enfin, les engrais minéraux coûtent chers et ne sont pas à la portée des bourses de tous les paysans (Mario, 2016), ce qui limite son utilisation par plusieurs producteurs. Au regard de tous ces problèmes, il est nécessaire de trouver une alternative efficace pour améliorer la production des cultures.

Dans les années 1980, de grands espoirs ont été mis sur certains biofertilisants fixateurs d'azote, notamment les cyanobactéries libres, pour accroître la productivité des rizières (Cronberg *et al.*, 2006). En effet, l'azote nitrique est la source d'azote préférée dans la plupart des milieux de culture. Certaines cyanobactéries se développent de façon symbiotique avec des champignons, des végétaux (Bjorn & Matthias, 2003). Ces symbioses, comme celle établie avec *Azolla sp*, ont un rôle écologique et agronomique important. Les cyanobactéries du genre *Anabaena azollae* n'ont pas pour seul avantage d'offrir de l'azote aux rizières. Ils ont aussi le pouvoir de limiter le développement des mauvaises herbes, d'enrichir les sols en matières organiques et de rendre plus disponible le phosphore et l'azote nécessaire aux plantes (ADRAO, 1985). Ainsi, les engrais biologiques semblent constituer une alternative efficace qui pourraient servir de complément aux fertilisants agricoles. Il faut dès lors, envisager d'autres solutions pour permettre un accès facile de ces biofertilisants, afin de limiter les risques économiques, environnementaux, sociaux liés à l'utilisation des engrais minéraux (NPK et urée).

En l'état actuel des connaissances, il apparaît donc nécessaire d'exploiter au mieux le potentiel agronomique des cyanobactéries fixatrices d'azote. Cette exploitation permettra de favoriser le développement et la production des souches originaires de chaque zone par certaines techniques (Pierre, 1996). Les composts à base de déchet d'animaux sont aussi utilisés pour l'amendement des sols (ADRAO, 1985) et leur possible association avec des cyanobactéries pour l'amélioration de leurs pouvoir fertilisants pourrait être envisagée.

L'objectif général du présent travail est d'améliorer la productivité de la tomate par l'utilisation de biofertilisant à base de *Azolla sp* et du compost. Spécifiquement, il s'agit de :

- optimiser la production *in vivo* de *Azolla sp* par l'utilisation de déchet de ferme ;
- déterminer les effets des biofertilisants à base de *Azolla caroliniana* et du compost en comparaison avec le fertilisant chimique (NPK) sur la productivité de la tomate ;
- déterminer la qualité nutritionnelle et organoleptique des fruits de tomates produits.

Introduction

Pour atteindre nos objectifs, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- les éléments nutritifs contenus dans le filtrat à base de fiente de poulet permettent d'optimiser la production de la fougère *Azolla sp* ;
- les biofertilisants à base de *Azolla sp* et de compost permettent d'accroître le rendement des cultures maraîchères ;
- les qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits sont améliorées par l'action des biofertilisants.

Outre l'introduction, la conclusion suivie des perspectives, les références bibliographiques et la publication, ce document comporte trois parties essentielles. La première partie est consacré aux généralités. La deuxième partie concerne le matériel et les méthodes d'étude utilisés. Enfin, la troisième partie est constituée des résultats obtenus, suivis de leur discussion.



PREMIERE PARTIE :
GENERALITES

CHAPITRE 1 : TOMATE

1.1. Origine et distribution

La tomate (*Solanum lycopersicum*), est originaire de la région des Andes en Amérique du Sud. Sa culture s'est propagée en Asie du Sud et de l'Est, en Afrique et au Moyen Orient. Plus récemment, la tomate a été introduite dans d'autres régions de l'Amérique du Sud et au Mexique (Shankara *et al.*, 2005). Sa première description fut faite par un botaniste italien du nom de Matthioli. Il évoque une tomate jaune qui donnera « pomodoro » comme nom à la tomate italienne, ce qui signifiait « pomme d'or » (Toussaint & Baudoin, 2010). Aujourd'hui, la plante tropicale s'est adaptée à des régions plus froides que celles de son pays d'origine et la tomate est cultivée dans les pays chauds ou tempérés du monde entier. Sa culture en termes de maraichage a démarré en Côte d'Ivoire dans les années 1970 par les systèmes de cultures intensives sur des périmètres irrigués. Sa production se poursuit actuellement en systèmes de cultures semi-modernes avec des pratiques à la fois traditionnelles et modernes (CNRA, 2016).

1.2. Taxonomie et systématique

Dès son introduction en Europe au 16^{ème} siècle, Hoquet (2005) avait inclu la tomate dans le genre *Solanum*, sous l'appellation *S. lycopersicum*, mais le botaniste anglais Miller (1768) la renomma *Lycopersicon esculentum*, en créant le genre *Lycopersicon* qui regroupait les différentes espèces de tomate. La taxonomie actuelle a replacé la tomate au sein du genre *Solanum*, section *Lycopersicon* qui regroupe 13 espèces et son nom est désormais *S. lycopersicum*.

La position systématique de la tomate se présente comme suit (Hoquet, 2005) :

Règne	: Plantae
Sous-règne	: Trachenobionta
Division	: Magnoliophyta
Classe	: Magnoliopsida
Sous-classe	: Asteridae
Ordre	: Solonales
Famille	: <i>Solanaceae</i>
Genre	: <i>Solanum</i>
Espèce	: <i>Solanum lycopersicum</i>

1.3. Caractéristiques botaniques

La tomate (*Solanum lycopersicum*) est une plante herbacée produisant des grappes de fruits et appartenant au groupe des légumes-fruits (Morsli, 2018). La tige est anguleuse, épaisse aux entre-nœuds, pubescente, recouverte de poils glandulaires et de poils simples (Kolev, 1976). La tige se lignifie en vieillissant et peut atteindre une longueur de 2 à 4 m. La croissance est monomodale mais devient sympodiale après quatre ou cinq feuilles (Chaux & Foury, 1994). Selon la structure de la plante de tomate (Figure 1), deux types de croissance sont observées ; une croissance dite indéterminée et l'autre dite déterminée (Koch, 2018).

Le système de profondeur racinaire de la tomate est pivotant et très puissant, pouvant atteindre jusqu'à 50 cm dans le sol. La racine principale produit une haute densité de racines latérales et adventices, ramifiées et fasciculées (Shankara *et al.*, 2005 ; Naika *et al.*, 2005).

Les feuilles sont composées de cinq à sept grandes folioles, de 10 à 50 cm de long et 10 à 30 cm de large, disposées en spirale. Ces folioles sont un peu dentées sur les bords et repliées en forme de cuillère ou même à bords roulés en dessous (Figure 2). Les folioles sont couvertes de poils glandulaires et rattachées à la tige par un pétiole mesurant entre 3 et 6 cm (Shankara *et al.*, 2005).

Les fleurs sont hermaphrodites, actinomorphes et pentamères (Polese, 2007) (Figure 3). La corolle compte autant de pétales que de sépales, soudés à la base. L'androcée compte cinq étamines ou plus, à déhiscence latérale, introrsées. Les anthères allongées forment un cône resserré autour du pistil. Ce dernier est constitué de plusieurs carpelles soudés, formant un ovaire supère biloculaire ou multiloculaire et à placentation centrale. L'ovaire supère est formé d'au moins deux carpelles soudés, orientés obliquement par rapport à l'axe médian de la fleur et comprend de très nombreux ovules en placentation axile (Judd & Cambell, 2002).

Le fruit de la tomate est une baie polysperme plus ou moins grosse, de forme variable (sphérique, oblongue, allongée). Il peut être de couleur blanche, rose, rouge, jaune, orange, verte ou noire, selon les variétés (Renaud, 2003 ; Toussaint & Baudoin, 2010). Les graines sont réparties dans des loges remplies de gel. La paroi de l'ovaire évolue en péricarpe charnu et délimite des loges (Koch, 2018). Le placenta constitue la partie centrale du fruit et est à l'origine des tissus parenchymateux.

Les graines de la tomate sont nombreuses et en forme de rein ou de poire. Elles sont poilues, beiges, de 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large. L'embryon est enroulé dans l'albumen (Naika *et al.*, 2005).

Généralités

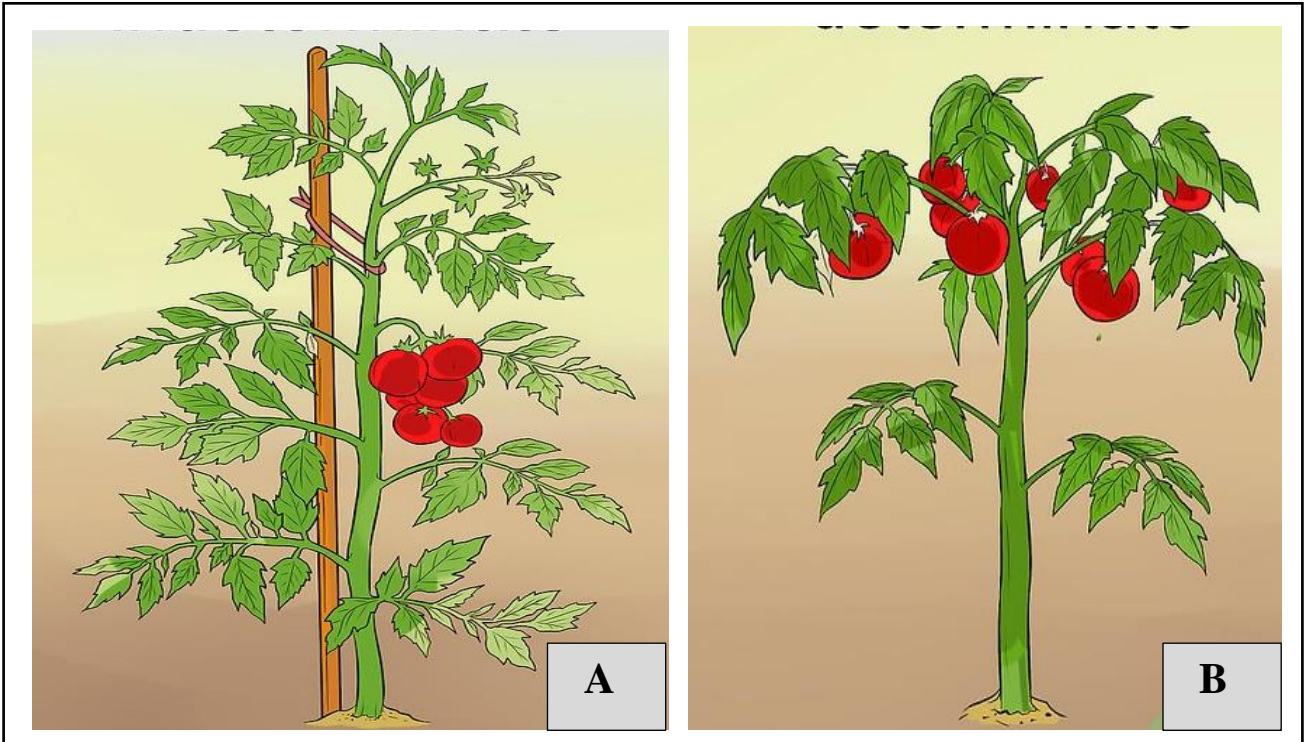


Figure 1 : Structure de la plante de tomate (Koch, 2018)

(A : Croissance indéterminée ; B : Croissance déterminée)



1cm

Figure 2 : Feuille composée imparipennée de tomate



Figure 3 : Fleurs de tomate (Morsli, 2018)

1.4. Biologie et écologie de la tomate

Solanum lycopersicum est une plante dont la reproduction se fait par graines. Après le semis des graines, la levée s'effectue au bout de 6 à 8 jours (Diane, 2004). Le premier indice de germination est l'apparition de la petite racine blanche appelée radicule. A mesure que la radicule s'enfonce dans le substrat de croissance, l'hypocotyle (portion de la tige située sous les cotylédons) adopte une forme courbe désignée sous le nom de crochet plumulaire (Moussa, 2006). Ce crochet s'allonge jusqu'à la surface du sol, où la lumière contribue à le redresser et à le verdir. Lorsque la graine est fermement ancrée dans le sol et que le crochet plumulaire est redressé, les cotylédons (feuilles germinales) se détachent de l'enveloppe (tégument) de la graine et le tégument reste dans le sol. Une fois que les cotylédons sont entièrement formés, les vraies feuilles apparaissent peu après, au point de croissance, qui démarre la phase juvénile (Moussa, 2006).

La phase juvénile est celle qui s'étend de la germination de la graine plantée à l'acquisition de la maturité florale. Elle dure 50 à 60 jours. Durant cette phase, la radicule s'allonge, les racines secondaires apparaissent et les deux premières vraies feuilles découpées apparaissent vers le 11^{ème} jour. Le plant, vers le 20^{ème} jour, atteint 15 à 20 cm de hauteur, possède au moins 3 à 4 paires de feuilles et est prêt pour être repiqué au champ (Diane, 2004).

Le repiquage des plants de tomates au champ exige des conditions idéales (température, lumière, pH, sol, eau et humidité) pour son bon développement et sa bonne productivité.

La plante de tomate est capable de pousser sous des climats variés et des sols de plus ou moins bonne qualité. Cependant, elle s'est adaptée à une grande diversité de conditions climatiques, allant du climat tempéré au climat tropical chaud et humide. Son développement optimal requiert un climat tempéré chaud et des températures comprises entre 18 et 27 °C avec 25 °C comme température optimale. L'intensité lumineuse et la durée du jour, jouent également un rôle important sur le développement et la floraison. Les plantes peuvent surmonter un certain intervalle de températures, mais en-dessous de 10°C et au-dessus de 38°C les tissus des plantes sont endommagés (Shankara *et al.*, 2005).

Le pH du milieu de culture est important pour la vie de la plante de tomate. La tomate tolère modérément un large intervalle de pH, mais pousse mieux dans des sols où la valeur du pH varie entre 5,5 et 6,8 et où l'approvisionnement en éléments nutritifs est adéquat et suffisant (Shankara *et al.*, 2005). Pour la culture, il suffit d'avoir un sol profond, frais mais non humide, assez riche en humus et en matières fertilisantes. En culture de contre-saison par contre, il faut

la cultiver que sur les sols riches en matière organique, car les sols argileux ne donnent que de très faibles rendements (Diane, 2004).

Il faut pouvoir compter sur au moins trois mois de pluie. Car, pendant les quarante jours qui suivent la transplantation, les jeunes plants ont besoins de 50 m³ d'eau/ha/jour. Puis, pendant les périodes de floraison et de maturation, ces besoins doublent et sont de l'ordre de 100 à 110 m³ d'eau/ha/jour (Diane, 2004). Le stress causé par une carence en eau et les longues périodes arides fait tomber les bourgeons et les fleurs et provoque le fendillement des fruits (Shankara *et al.*, 2005). Par contre, lorsque les averses sont très intenses et l'humidité est très élevée, la croissance des moisissures et la pourriture des fruits sont plus importants. Les temps nuageux ralentissent le mûrissement des fruits des plants de tomate (Diane, 2004).

1.5. Pathologie liée à la culture de la tomate

De la levée et pratiquement jusqu'à la récolte, les cultures de tomate sont sujettes à de nombreuses maladies et attaques de ravageurs causées par divers agents pathogènes tels que les virus, les bactéries, les champignons, les nématodes, les insectes, etc. (Causse *et al.*, 2000). La sensibilité de la tomate aux maladies constitue un facteur limitant pour sa culture. En effet, les maladies les plus importantes sont d'origines fongiques, nommées aussi l'alternariose (Bekkar, 2014). Outre les maladies fongiques, il existe des maladies bactériennes d'origine telluriques telles que le flétrissement bactérien causé par *Ralstonia solanacearum*, la gale bactérienne au *Xanthomonas campestris* pv. *Vesicatoria* (Causse *et al.*, 2000). D'autres ravageurs comme les aleurodes, les pucerons, les nématodes des racines s'attaquent aussi à la tomate.

Le contrôle de ces bio agresseurs est possible grâce aux différentes techniques culturales et aux différentes molécules phytosanitaires.

1.6. Importance et atouts de la tomate

L'utilité de la tomate dans le domaine nutritionnel, économique et sanitaire sont remarquables.

Dans la nutrition humaine, il est reconnu qu'une alimentation variée et riche en fruits et légumes frais permet de diminuer les risques de maladies cardiovasculaires et de cancers (Hall *et al.*, 2008). A maturité, un fruit de tomate contient 95 % d'eau, 5 % de matière sèche comprenant entre autre 50 % de sucres, 25 % d'acides organiques, 8% de minéraux, 2 % d'acides aminés, des caroténoïdes et autres métabolites secondaires (Davies & Hobson 1981). Parmi les caroténoïdes, la β -carotène est très importante, car elle est associée à la provitamine A. Le lycopène, aussi présent en grande quantité dans le fruit mûr (entre 3 et 8 mg/100 g de

Généralités

matière fraîche) mais surtout dans les concentrés de tomate (30 mg pour 100 g de concentré), joue un rôle d'antioxydant dans l'alimentation humaine (Giovannucci, 1999). La tomate malgré sa faible teneur en protéines (1,1 %) contient pratiquement tous les acides aminés (Alhag Dow, 2006). La composition en lipides varie en fonction de la variété et du degré de maturité lors de la récolte. Elle contient plus de 33 acides gras dans le péricarpe et sa teneur en lipides est de 0,3 g par 100 g de poids frais (Benard, 2009). Ce légume se consomme soit cru, en mélange avec d'autres ingrédients ou en jus, soit cuit sous la forme préparée.

Du point de vue économique, la tomate est cultivée dans de nombreux pays du monde (170 pays selon la FAO). Elle est la troisième espèce la plus cultivée au monde après la pomme de terre et la patate douce et le 2^e légume le plus consommé (De Broglie & Guérouilt, 2005). Ce légume représente un enjeu économique qui le soumet à une culture très intensive, avec cent cinquante million t/an de tomates produites dans le monde (FAO, 2005). Selon les statistiques de l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production mondiale de tomates s'élevait à 165,5 millions de tonnes pour une surface de 4,77 millions d'hectares (Grogga, 2018). Ces chiffres ne tiennent toutefois compte que de la production commercialisée, et n'incluent pas les productions familiales et vivrières qui peuvent être non négligeables dans certaines régions. Cette production est répartie sur tous les continents.

Au plan sanitaire, le rôle médicinal de la tomate est connu depuis bien longtemps chez les Incas en Amérique de sud, où ils utilisent la feuille fraîche du plant de tomate comme antibiotique (Philouze & Hedde, 1995).

Au vu de l'importance de la tomate dans le monde tant sur le plan nutritionnel, économique que sanitaire, il paraît indispensable de valoriser sa culture en proposant de nouveaux fertilisants qui puissent garantir son rendement et sa qualité.

CHAPITRE 2 : FERTILISANTS

2.1. Définition

Un fertilisant est un engrais, un type de substance organique ou inorganique qui contient des éléments nutritifs sous des formes assimilables par les plantes (DDrinkwater & Snapp, 2007). Il permet de maintenir ou d'augmenter les éléments nutritifs dans le sol, d'améliorer la qualité nutritionnelle du végétal, de stimuler la croissance végétative des plantes, etc. (DDrinkwater & Snapp, 2007). Cette capacité fertilisante repose sur un ensemble de propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol lui-même. Cet ensemble de propriétés du sol se rapporte à sa structure, sa profondeur, sa teneur en éléments nutritifs et humus, son pouvoir d'absorption et sa teneur en éventuels éléments toxiques (Doucet, 2001).

La fertilisation est l'enrichissement du sol par des engrais. Elle a pour buts :

- d'améliorer ou de maintenir les caractéristiques du sol citées ci-dessus, aptes à optimiser l'absorption par les plantes des éléments nécessaires à leur croissance et au rendement ;
- d'assurer la complémentarité des fournitures nécessaires en provenance du sol (Falisse & Lambert, 1994).

Deux types de fertilisants sont utilisés en milieu agricole : les biofertilisants et les fertilisants chimiques (Ohyama, 2006).

2.2. Biofertilisants

Les biofertilisants ou fertilisants organiques ou engrais organiques sont définis comme des préparations contenant des cellules vivantes ou des cellules latentes de souches de micro-organismes efficaces (Vessey, 2003). Ils aident à l'absorption des éléments minéraux par les plantes cultivées, suite à leurs interactions dans la rhizosphère lorsqu'ils sont appliqués sur les semences ou dans le sol. Ils accélèrent certains processus microbiens dans le sol impliqués dans l'augmentation de la disponibilité des nutriments dans une forme facilement assimilable par les plantes (Vessey, 2003).

Les biofertilisants sont d'origine végétale comme animale, ils doivent cependant être minéralisés avant leur utilisation par la plante. Ainsi, l'utilisation des biofertilisants est proposée pour améliorer les rendements des cultures tout en assurant une meilleure durabilité des systèmes de culture (Ohyama, 2006).

2.2.1. Biofertilisants d'origine animale

Selon Doucet (2001), les principaux engrais organiques d'origine animale peuvent être obtenus à partir du sang desséché, des déchets d'abattoir desséchés, des farines de poisson, de la poudre d'os, du fumier de ferme, des purins et des lisiers. Les plus utilisés sont :

- le fumier de ferme ;
- les purins ;
- les lisiers.

2.2.1.1. Fumier de ferme

Le fumier de ferme est constitué par un mélange de litière et de déjections animales ayant subi des fermentations plus ou moins poussées en étables et en tas. Sa composition varie dans de très larges limites suivant la nature et la proportion des matières en présence. Aussi, la composition des excréments varie suivant l'espèce animale, l'âge, la production des animaux et le régime alimentaire de ceux-ci (Al Hassani & Persoon, 1994). Selon Doucet (2001), les fumiers les plus riches sont dans l'ordre de ceux de volaille, de cheval, des ovins et des porcins. Le fumier peut être épandu sur tous les sols et utilisés pour presque toutes les cultures.

2.2.1.2. Purin

Le purin est un engrais organique constitué d'une fraction de liquide qui s'écoule du fumier mis en tas, principalement composé des urines des animaux. La qualité des purins dépend du mode de gestion du bétail et de la dilution par les eaux de pluie ou de lavage (Mazoyer, 2002).

2.2.1.3. Lisier

Le lisier est le mélange de déjections liquides et solides des animaux d'élevage et d'eau, et un excellent engrais organique, particulièrement riche en azote (MRE, 2002).

2.2.2. Biofertilisants d'origine végétale

Les engrais d'origine végétale apportent de la matière organique au sol. Beaucoup de végétaux et même des résidus de végétaux peuvent être utilisés comme fumures organiques (Pousset, 2011).

2.2.2.1. Déchets agroalimentaires

Les déchets organiques agroalimentaires désignent l'ensemble des déchets générés par les industries agroalimentaires de transformation et de conditionnement de produits alimentaires animaux ou végétaux. Ils présentent une variabilité saisonnière marquée, ainsi qu'une grande diversité. On peut citer les bagasses de canne à sucre, les pulpes de café, les écorces des noix de coco, les coques d'arachide, les sciures de bois, les balles de riz, les pulpes de betteraves, les déchets de légumes en conserverie, les déchets de viande (Allison, 1973).

2.2.2.2. Engrais verts

Un engrais vert est un matériel végétal incorporé vert dans le sol, après le stade de maturité, dans le but d'améliorer la fertilité du sol (FAO, 1987). Il peut s'agir de toute sorte de matière végétale (brindilles, feuilles, plantes entières feuillues...) (Allison, 1973). La culture d'une légumineuse apporte par contre de l'azote. De nos jours, les engrais verts sont des cultures souvent insérées dans les plannings de rotation en tant qu'inter-culture. Ceci a pour but de créer une couverture végétale sur le sol jusqu'à leur destruction par broyage ou gel, et leur enfouissement (Kautz *et al.*, 2004 ; Pousset, 2011).

2.2.3. Biofertilisants à base des champignons mycorhiziens arbusculaires

Les mycorhizes arbusculaires jouent un rôle considérable dans l'amélioration de la nutrition du végétal, notamment en phosphore (Van Vuuren *et al.*, 2010). Le mycorhize représente une association symbiotique entre des champignons telluriques et les racines des plantes. Ces associations mycorhiziennes concernent plus de 95% des plantes terrestres dont la plupart sont des plantes agricoles et horticoles (Barea *et al.*, 1980). Le type de symbiose est connu par sa capacité de fournir un meilleur accès aux éléments nutritifs du sol, aidant ainsi les plantes à mieux résister aux stress environnementaux (sécheresse, salinité, attaque par des agents pathogènes...) de façon naturelle (Smith & Read, 2008). Au-delà de ces effets bénéfiques sur le développement et la santé des plantes, le réseau mycélien extra-radiculaire qui se développe dans le sol, favorise la rétention de ses agrégats, en stabilisant ainsi sa structure et sa qualité (Jeffries *et al.*, 2003 ; Gianinazzi *et al.*, 2010).

2.2.4. Biofertilisants à base de bactéries

2.2.4.1. Rhizobactéries

Les rhizobactéries sont définies comme des bactéries qui colonisent les racines ou la rhizosphère du sol et qui sont bénéfiques aux cultures (Beauchamp, 1993). Ces bactéries sont

actuellement commercialisées sous forme d'inoculum. Elles favorisent la croissance des cultures par plusieurs mécanismes : la suppression des maladies des plantes (par des bio-protecteurs), l'amélioration de l'acquisition des éléments nutritifs (biofertilisants), ou la production de phytohormones (biostimulants) (Mohapatra *et al.*, 2013).

2.2.4.2. Bactéries solubilisatrices de silicate

Les bactéries solubilisatrices de silicate sont capables de dégrader les silicates qui sont des minéraux formés à partir d'un motif élémentaire tétraédrique, l'oxyde de silicium (Amutha *et al.*, 2014). Ils fournissent au milieu :

- des ions H^+ favorisant ainsi l'hydrolyse du silicate ;
- les acides organiques comme l'acide citrique, l'acide oxalique, les acides aminés et les acides hydro-carboxyliques dont le complexe avec des cations permet de promouvoir leur enlèvement et leur rétention dans le milieu à l'état dissous (Mohapatra *et al.*, 2013).

2.2.4.3. Bactéries fixatrices d'azote

Les bactéries fixatrices d'azote ont été récoltées dans les plantes cultivées présentant le plus souvent un taux d'azote fixé inférieure à 20 kg par hectare et par cycle cultural (Roger & Ladha, 1992). Ces bactéries peuvent exister soit sous forme libre (seules ou en symbiose avec d'autres bactéries du sol), soit en symbiose avec des plantes tout en assurant la fixation de l'azote atmosphérique (N_2). En fonction de leur régime respiratoire, ces micro-organismes peuvent être soit aérobies soit anaérobies (Franche *et al.*, 2009).

❖ Bactéries non symbiotiques (*Azotobacter*)

Il existe plusieurs espèces d'*Azotobacter*. Parmi ces espèces, *A. chroococcum* présente l'espèce dominante dans les sols arables. Ils sont capables de fixer l' N_2 pour une dose qui varie de 2 à 15 mg N_2 / g de sol à partir d'une source de carbone dans les milieux de culture (Amutha *et al.*, 2014).

❖ Bactéries symbiotiques

✓ Rhizobium

Les rhizobiums sont des bactéries du sol qui se caractérisent par leur faculté unique à infecter les poils absorbants des légumineuses et de produire sur les racines des nodules, siège de la fixation d'azote atmosphérique (Franche *et al.*, 2009).

Ce sont des micro-organismes en forme de bâtonnet qui existent uniquement à l'état végétatif. Ce sont des bactéries Gram négatif. A la différence de nombreux autres micro-organismes du sol, le rhizobium ne produit pas de spores. Ils sont aérobies et mobiles (Jordan, 1984). Le rhizobium est classé parmi les espèces économiquement importantes. Cet intérêt provient du fait de l'importance de la quantité d'azote qu'il peut fixer. Cette fixation se déroule au sein des nodosités, sur les racines des légumineuses (Gage, 2004).

✓ **Azospirillum**

Les bactéries du genre *Azospirillum* sont des habitants primaires du sol. On les retrouve aussi en symbiose à l'intérieur des espaces intercellulaires du cortex racinaire de certaines graminées (Mohapatra *et al.*, 2013). Outre la fixation de l'azote, l'inoculation des plants par *Azospirillum* présente quelques avantages supplémentaires tels que la production de substances de croissance, la résistance aux maladies et la tolérance à la sécheresse (Mohapatra *et al.*, 2013). A ce jour, cinq espèces d'*Azospirillum* ont été décrites : *A. brasilense*, *A. lipoferum*, *A. amazonense*, *A. halopraeferens* et *A. irakense* (Mohapatra *et al.*, 2013).

✓ **Cyanobactéries**

Les cyanobactéries (algue bleu-vert) ont été mises à profit dans la culture du riz. Elles sont capables de fixer entre 20 et 30 kg d'azote / ha dans des conditions idéales, mais leur utilisation n'est pas répandue (Amutha *et al.*, 2014).

2.2.5. *Azolla* sp

Azolla sp est une fougère flottante qui fixe l'azote atmosphérique en association avec l'algue bleu-vert (*Anabaena azollae*) fixatrice d'azote. Les frondes de *Azolla* sp se composent de sporophytes avec un rhizome flottant, de petites feuilles bilobées et des racines qui se chevauchent entre elles. Elle est utilisée comme engrais biologique pour le riz dans les zones humides en fournissant environ 40 à 60 kg d'azote / ha par récolte de riz (Pierre, 1993).

Azolla est le biofertilisant d'origine végétale utilisée dans cette étude.

2.2.5.1. Origine et distribution de *Azolla* sp

Le nom *Azolla* sp vient du grec *azo*, qui signifie "être desséché" (DDrinkwater & Snapp, 2007). Son épithète *filiculoides* vient du latin *filic* et *oides*, signifiant "fougère" et "qui ressemble à" (Val'hor, 2017). Largement distribuée à travers les régions tempérées et tropicales, l'utilisation de *Azolla* sp remonte au 11^{ème} siècle au Viêt-nam et au moins au 14^{ème} siècle, en Chine. La nature symbiotique de *Azolla* sp et l'identification du symbiote fixateur d'azote

remontent au 19^{ème} siècle (Wei *et al.*, 1986). Elle se caractérise par une productivité élevée des substances azotées et une forte teneur en protéines. Les protéines confèrent à *Azolla sp* des qualités fertilisantes et alimentaires (FAO, 1978). La fougère *Azolla sp* peut produire de 10 à 15 tonnes de matière verte par semaine, contenant de 30 à 40 kg d'azote (Van Hove *et al.*, 1983).

2.2.5.2. Taxonomie et systématique

Le genre *Azolla sp* appartient à la division des Ptéridophytes, ordre des Salviniiales, famille des Azollaceae. *Azolla sp* est réparti en deux sections ou sous-genres qui se différencient par le nombre des flotteurs des mégaspores (Moore, 1969). Il existe six espèces qui se divisent en deux sections en fonction de critères morphologiques (morphologie des formes végétatives, frondes et des organes reproducteurs). Les deux sections sont les *Euazolla* avec racines isolées et les *Rhizosperma* avec racines par faisceaux. La première section comprend quatre espèces originaires d'Amérique (*A. caroliniana*, *A. filiculoïdes*, *A. mexicana*, *A. microphylla*) et aussi introduite via les aquariums et les jardins botaniques pour la première fois en France en 1880. La seconde section comprend deux espèces originaires d'Afrique et d'Asie (*A. nilotica* et *A. pinnata*) (Franche & Cohenbazire, 1985). L'homme a depuis le XIX^e siècle, dispersé ces Ptéridophytes, particulièrement *A. caroliniana* et *A. filiculoïdes*.

La position systématique de *Azolla sp* se présente comme suit (Diomande *et al.*, 2017) :

Règne	: Plantae
Sous-règne	: Tracheobionta
Division	: Pteridophyta
Classe	: Liliopsida
Ordre	: Hydropteridales
Famille	: Azollaceae
Genre	: <i>Azolla</i>

Les deux espèces utilisées dans cette étude sont :

- *Azolla caroliniana* ;
- *Azolla filiculoïdes*.

La fougère de Caroline, *Azolla caroliniana* est une espèce pouvant se fixer sur la vase. La tige porte deux rangées de feuilles de petite taille, en forme d'écaille de 7 à 20 mm Les feuilles qui se recouvrent partiellement sont translucides et gris blanc immergées, vert pâle, avec une marge rosée à l'air libre. La face inférieure présente de fins poils papillaires et de longs rhizoïdes filiformes (Nandabalan & Kannaiyan 1986).

L'espèce *Azolla filiculoides* est une espèce pouvant aussi se fixer sur la vase, originaire des zones tempérées chaudes et tropicales (Müller, 2006). Chez *A. filiculoides* les tiges, capillaires mesurent 2 à 5 cm et la principale est fortement ramifiée. Elles sont horizontales et émettent de longues racines adventives. Les rameaux sont alternes et paraissent dichotomes (coupés en deux) (Groga *et al.*, 2018). Les frondes mesurent environ 10 à 20 mm, d'un vert allant au rouge brun lorsque la plante est directement exposée au soleil (Janes, 1996). Elles sont bordées d'une large bande membraneuse. Chaque feuille a deux lobes, la première flotte et contient de la chlorophylle ainsi que des cyanobactéries dans une cavité avec lesquelles la plante est en symbiose. Le deuxième n'est pas photosynthétique et est immergé (Rahagarison, 2005).

2.2.5.3. Caractéristiques botaniques de *Azolla sp*

Azolla sp est une fougère aquatique de petites dimensions (1,5 à 3,5 cm) (Figure 4), flottant à la surface des eaux calmes, tempérées ou tropicales. Cette petite fougère aquatique est généralement appelée « fronde ». Elle est constituée d'une tige principale, croissant à la surface de l'eau, avec des feuilles alternes ainsi que des racines adventives se formant à intervalles réguliers. A l'aisselle de certaines feuilles se développent des tiges secondaires ayant les mêmes caractéristiques que la tige principale. Elles portent à leur tour les tiges de troisième ordre. Chaque feuille est bilobée : une supérieure, flottante et chlorophyllienne, l'autre inférieure, immergée chlorotique (Van Hove *et al.*, 1983). Les plantes de *Azolla sp* sont de forme polygonale ou triangulaire (Lumpkin & Plucknett, 1980).

2.2.5.4. Biologie et écologie de *Azolla sp*

Comme pour toutes les fougères, on distingue pour *Azolla sp* une reproduction végétative et une reproduction sexuée.

La reproduction végétative se fait dans les conditions climatiques favorables (Becking, 1979). Dans ces conditions, la reproduction végétative survient lorsque la fougère atteint environ 1 à 2 cm d'envergure. Les ramifications les plus âgées se détachent et donnent naissance à des frondes isolées plus petites. Durant cette phase, *Anabaena* se reproduit de façon synchrone avec l'hôte (Becking, 1979).

Lorsque les conditions environnantes deviennent défavorables (chaleur ou froid intense), le cycle de reproduction sexuée est initié. Il se forme alors, sous la fougère, des spores mâles (mégaspores) et des spores femelles (microspores) qui constituent des formes de survie de *Azolla sp* (Figure 5). La fécondation du gamète femelle par le gamète mâle redonne naissance à une jeune plantule. Durant cette phase, la continuité de l'association entre la Ptéridophyte et



Figure 4 : Frondes de *Azolla sp.*

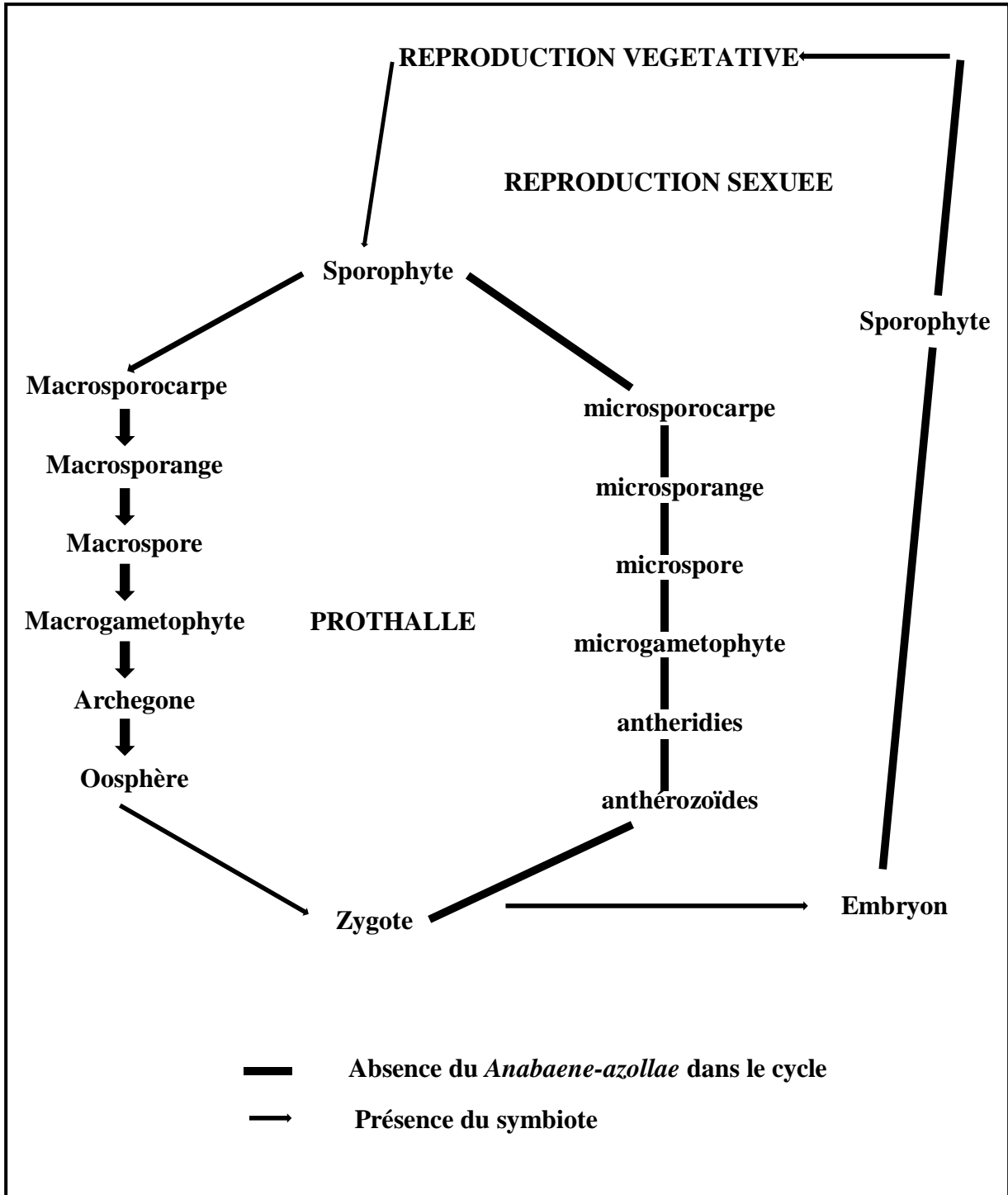


Figure 5 : Schéma du cycle de reproduction de *Azolla sp* (Becking, 1979)

la Cyanobactérie est assurée par la présence de spores de *Anabaena* dans les mégaspores de *Azolla sp* (Franche & Cohenbazire, 1985).

Les conditions écologiques de *Azolla sp* sont importantes pour son développement. En effet, *Azolla sp* est fragile et exige un certain nombre de facteurs pour vivre, pour se développer et pour croître. Ces facteurs sont entre autre l'eau, la température et la lumière. Elle ne résiste pas à un taux d'humidité inférieure à 60 %. Elle est très sensible à la sécheresse et meurt en quelques heures lorsque le sol s'assèche (Becking, 1979). La nutrition minérale de *Azolla sp* est favorisée par une couche d'eau n'excédant pas 5 à 10 cm. Cela est dû au fait que les racines sont proches du sol. Plante d'eau douce, *Azolla sp* ne supporte qu'un degré de salinité allant de 0,05 à 0,1 %. Sa croissance s'arrête dans une solution contenant 1,3 % de sels (Haller *et al.*, 1974). *Azolla sp* s'adapte à des conditions climatiques extrêmement variées. Elle peut survivre entre 15°C et 40°C. Pour l'intensité lumineuse, en conditions thermiques optimales, la saturation est atteinte à environ 50 % de l'intensité maximale. La croissance reste, cependant, bonne même aux intensités lumineuses élevées (Becking, 1979). *Azolla sp* est, particulièrement tolérant au pH du milieu. Elle survit dans une gamme allant de pH 3,5 à 10 et sa croissance est pratiquement identique de pH 4,5 à 7 (Ashton, 1974).

2.2.5.5. Importance et atouts

Les propriétés fertilisantes, alimentaires, environnementales, sanitaire et cosmétiques de *Azolla sp* sont importantes et constituent un atout pour ce végétal.

En agriculture, *Azolla sp* est utilisée comme engrais vert dans les rizières de nombreux pays asiatiques. En effet, *Azolla sp* grâce à sa symbiose avec la cyanobactérie *Anabaena*, fixe l'azote atmosphérique et le libère à sa mort dans le milieu (FAO, 1978).

En milieu environnemental, la fougère *Azolla sp* est utilisée dans le traitement des eaux riches en nutriments et métaux lourds provenant des eaux industrielles par biofiltration (Hédji *et al.*, 2014). Dans ces milieux, *Azolla sp* permet aussi de contrôler la prolifération des mauvaises herbes et diminue les pertes d'eau par évaporation (Rahagarison, 2005).

En Alimentation humaine et animale, cette fougère du fait de ses caractéristiques nutritionnelles, elle est convenable pour la consommation humaine et pour supplémer l'aliment de divers animaux comme les poissons, les canards, le bétail et la volaille (Hassan & Chakrabarti, 2009 ; Raja *et al.*, 2012). En effet, *Azolla sp* est utilisée avec succès comme ingrédient dans l'alimentation de la volaille (Hédji *et al.*, 2014). Au Bénin, elle a été utilisé dans l'aquaculture et dans l'alimentation des porcs (Accodji *et al.*, 2009).

Sur le plan sanitaire lié à l'homme, on découvre chaque jour un peu plus le rôle primordial joué par les minéraux et oligo-éléments de la fougère *Azolla sp.* Ainsi, ses extraits sont régulièrement utilisés dans la fabrication de produits de santé et des crèmes cosmétologiques (Groga *et al.*, 2018).

2.2.6. Cyanobactérie *Anabaena azollae*

Anabaena azollae est une cyanobactérie qui se présente sous forme de filaments non ramifiés, constitués de deux types de cellules. Le premier est formé des cellules végétatives plus nombreuses et plus petites. Le deuxième par contre est constitué des hétérocystes. Ces dernières sont le siège de la fixation de l'azote atmosphérique (Blondeau, 1981). Le développement de *A. azollae* (Figure 6) est synchrone avec celui de *Azolla sp* lors de la formation de la cavité de la feuille (Hills & Gopal, 1967). Au départ, les filaments de *Anabaena* générateurs de la colonie dans le méristème apical de la fougère, sont formés uniquement de cellules végétatives. Lorsque le développement de la cavité foliaire commence, les hétérocystes commencent aussi à se différencier des cellules végétatives (Peters *et al.*, 1982). Les deux types de cellules de *Anabaena* communiquent entre eux par l'intermédiaire d'un pore (Blondeau, 1981). La symbiose hôte-bactérie permet des échanges mutuels entre les deux partenaires. Ces échanges entre hôte et endophyte, selon Van hove *et al.* (1983), se font grâce aux poils pluricellulaires provenant des cellules épidermiques qui bordent la cavité foliaire de *Azolla sp* où loge *Anabaena* (Figure 6).

2.3. Compost d'origine végétal ou animal

2.3.1. Définition

Le compost est le fruit du compostage. Le compostage est un procédé biologique de conversion et de valorisation de substrats organiques en un produit stabilisé, hygiénique et riche en composés humiques (Inckel *et al.*, 2005). Il est issu du traitement d'un ensemble de matières végétales ou animales (Culot & Lebeau, 2000). Il consiste à faire démarrer, en milieu normalement anaérobie, une fermentation aérobie en atmosphère confinée. Le compost est un amendement organique, c'est-à-dire un produit riche en matière organique stabilisée, à effet principal sur la structure et la fertilité des sols agricoles (Bromblet & Somaroo, 2015). Il est aussi un processus de décomposition biologique des matières organiques par des microorganismes, suite à un traitement d'un ensemble de matières végétales et/ou animales (Culot & Lebeau, 2000). Il permet d'obtenir une matière relativement stable, utilisée pour amender un sol ou comme ingrédient d'un substrat de culture pour la production.

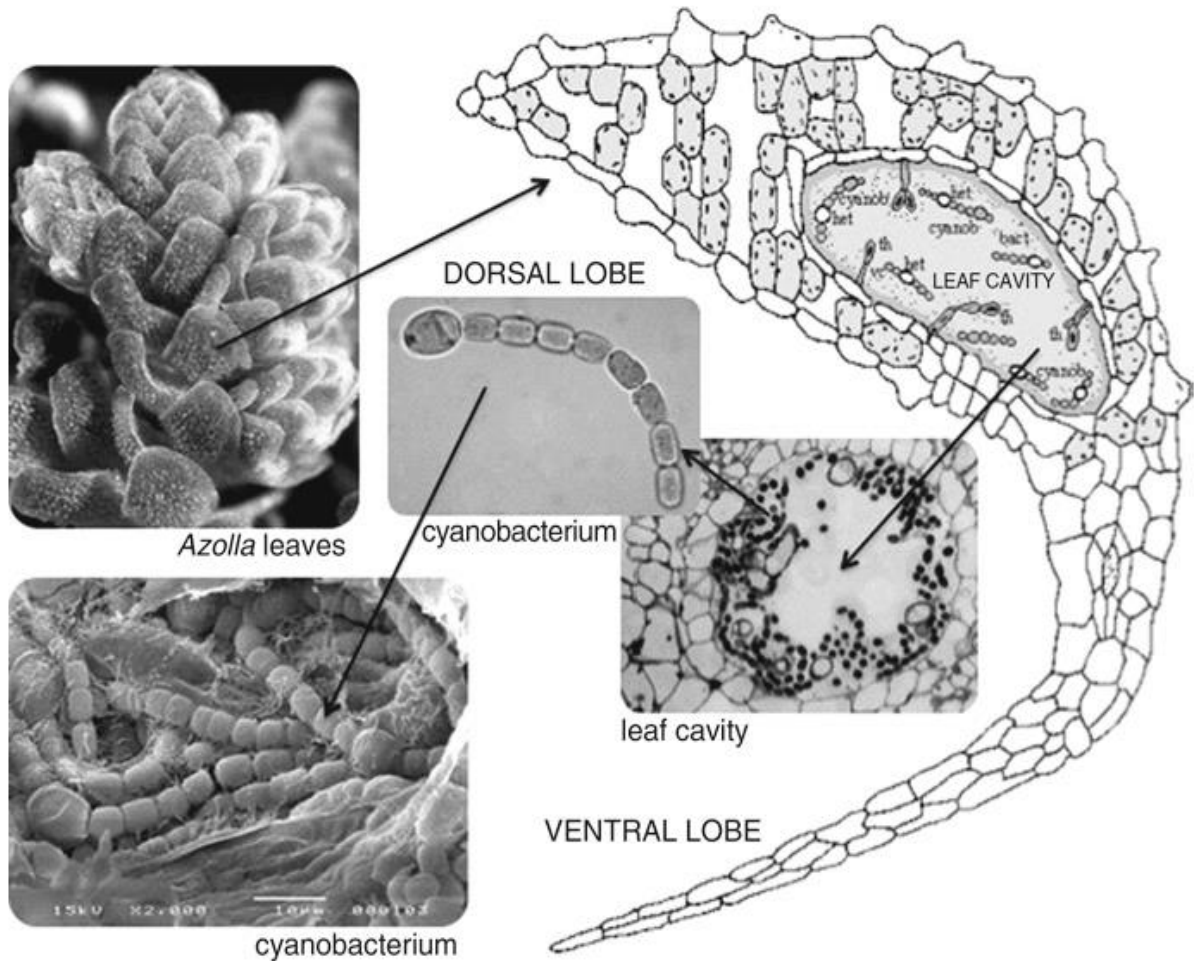


Figure 6 : Schéma de développement de la symbiose *Azolla* sp et *Anabaena-azollae* (Carrapiço, 2007)

2.3.2. Différents types de compostage

Le compostage peut être divisé en deux catégories selon la nature du processus de décomposition. Lors du compostage anaérobie, la décomposition se produit quand l'oxygène (O₂) est absent ou présent en quantité limitée. Dans ce processus, les microorganismes anaérobies dominent et élaborent des composés intermédiaires comme du méthane, des acides organiques, du sulfure d'hydrogène et d'autres substances. En l'absence d'oxygène, ces composés s'accumulent et ne sont pas métabolisés. Un grand nombre de ces composés ont des odeurs fortes et certains d'entre eux présentent une phytotoxicité (FAO, 2005).

Le compostage aérobie a lieu en présence d'une grande quantité d'oxygène. Au cours de ce processus, les micro-organismes aérobies décomposent la matière organique et produisent du gaz carbonique (CO₂), de l'ammoniac, de l'eau, de la chaleur et de l'humus, qui est le produit organique final (Culot & Lebeau, 2000). Le compost ainsi obtenu, qui a une forme relativement instable de matière organique, ne comporte que très peu de risque de phytotoxicité. La chaleur générée accélère la décomposition des protéines, des graisses et des sucres complexes tels que la cellulose et l'hémicellulose et réduit la durée du processus. De plus, ce processus détruit de nombreux micro-organismes, qui sont des pathogènes pour les humains ou les plantes, ainsi que les graines d'adventices, dans la mesure où la température atteinte est suffisamment élevée (FAO, 2005).

2.3.3. Buts et avantages des composts sur les cultures

Le but du compostage est de ramener au sol un produit de qualité à base de matière organique et d'éléments minéraux qui lui sont associés (Culot & Lebeau, 2000).

Les utilisations possibles du compost sont multiples, mais la fertilisation des sols reste son utilisation la plus classique. Avec la crise énergétique des années 70 - 80, le compost est intervenu dans la valorisation énergétique grâce à la chaleur dégagée sous l'action des microorganismes. Le compost peut être aussi utilisé en fonction de sa qualité, comme aliment des animaux (cas des porcs), ou comme matière première entrant dans la composition d'un aliment complet ou additif alimentaire pour prévenir des carences minérales chez les animaux (Devisscher, 2018). En culture de plein champ, le compost s'utilise comme un fumier, mais il doit être suffisamment élaboré pour ne pas entraîner de risque de blocage de l'azote du sol (Useni *et al.*, 2013).

En maraichage comme en horticulture d'ornement, son utilisation est particulièrement intéressante comme amendement organique de fond dans les plantations d'arbres et l'installation de nouveaux gazons. Il est également utilisé dans la culture de champignons et en

viticulture où il est principalement employé pour la protection des sols souvent dénudés. Par ailleurs, le compost trouve un bon débouché auprès des agriculteurs biologiques qui doivent exclure l'utilisation d'engrais de synthèse au profit des engrais naturels (Devisscher, 2018). Les études de Useni *et al.* (2012), Kasongo *et al.* (2013) et Useni *et al.* (2013) conduites en milieu naturel, ont montré que l'apport d'amendements organiques aux sols pauvres et acides permet de fournir les éléments nutritifs nécessaires à l'alimentation, la croissance et la production des plantes cultivées.

Les travaux de Abawi & Widmer (2000) signalent qu'un apport de compost par les producteurs est une alternative de gestion des cultures visant à réduire ou à éliminer les intrants synthétiques. Ces amendements améliorent la qualité du sol, augmentent la récolte et les rendements et réduisent les pertes dues aux phytoparasites et la pollution environnementale (Oka, 2010 ; Mulaji, 2011).

2.3.4. Technique de préparation du compost

La matière première susceptible de pouvoir être compostée, existe en grande quantité et en large diversité (Bromblet & Somaroo, 2015). La qualité du compost sera liée aux matières premières et à la manière dont le compostage sera mené. Les matières organiques comme le foin, la paille, le fumier, les feuilles, l'écorce, la sciure, les déchets de pommes de terre, de poissons et de fruits de mer, peuvent servir de matière première pour fabriquer du compost. Ces matières sont mélangées et mises en tas ou en andain dans les proportions voulues pour que le rapport carbone sur azote (C/N) soit optimal. Le compostage peut se faire soit en aérobie, soit en anaérobie. Pour assurer une bonne circulation et pénétration de l'air dans le tas, le mélange fréquent du compost est effectué. Elle permet une décomposition microbienne plus efficace et les matières premières se transforment plus facilement en compost. Lorsque le compost est obtenu en plaçant la matière dans de grands andains, sans retournements fréquents, on parle de compostage anaérobie, étant donné que très peu d'air pénètre dans le tas ; par conséquent, le processus de dégradation microbienne est plus lent. Chaque type de compostage possède ses propres caractéristiques et sa propre utilisation (Bromblet & Somaroo, 2015).

Les étapes pour un bon compostage sont nombreuses. Cependant, le compostage peut se faire directement au champ, sous pluie naturelle, pour réduire les transports et les manipulations avec des déchets d'origine agricole, animale et agro-industrielle (Culot & Lebeau, 2000).

Le processus de production du compost regroupe les étapes suivantes :

- collecte des matières à composter (pailles, son de riz, fumier, broussaille, déchets ménagers, etc);

- homogénéisation ou préparation physique : cette action nécessite des tris pour retirer du lot des matières peu ou non dégradables (morceau de tige, plastiques ...)
- mise en tas et malaxage après une bonne imbibition d'eau en formant le tas et en y ajoutant si possible de la matière activatrice de minéraux (calcium, phosphore) ou organiques (culture de bactéries) ;
- fermentation chaude ou compostage proprement dite (Inckel *et al.*, 2005), pour permettre la montée de la température avec effets d'hygiénisation en aérobie limitée (systèmes d'aération passive), ou en aérobie (système d'aération forcée) ;
- maturation pour créer une condition organochimique du compost qui indique la présence ou non d'acides organiques phytotoxiques (Culot & Lebeau, 2000).

L'ammoniac peut également être responsable de la phytotoxicité. Il existe des méthodes de détermination de la maturité du compost comme le test de phytotoxicité, l'étude de l'évolution du rapport C/N, l'analyse des polysaccharides, la mesure de l'ATP, les tests chromatographiques, colorimétriques, les tests de l'activité respiratoire, l'étude de la baisse de température (Culot & Lebeau, 2000).

2.4. Fertilisants chimiques

2.4.1. Définition

Les engrais chimiques selon la FAO (2003), représente tout produit contenant au moins 5% ou plus de l'un ou plus des trois principaux éléments nutritifs des plantes à savoir Azote, Phosphore et Potassium, fabriqué ou d'origine naturelle. De ces engrais chimiques, l'urée et le NPK sont les plus utilisés. Comme tous les autres engrais, ils sont destinés à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs de façon à améliorer leur croissance et augmenter le rendement et la qualité des cultures.

2.4.2. Engrais azotés

Les fertilisants minéraux azotés se présentent sous plusieurs formes. Les formes les plus rencontrées sont les formes nitriques, ammoniacales, ammoniaco-nitriques, urées, etc.

2.4.2.1. Engrais nitriques

Les engrais nitriques contiennent de l'azote sous la seule forme nitrique (NO₃). Cette forme regroupe le Nitrate de Sodium (NaNO₃) avec 16 % N et 30,5 % de Na₂O, le Nitrate de Calcium Ca(NO₃)₂ avec 15,5 % de N et 34 % de CaO, le Nitrate de Calcium et magnésium [Ca,

$Mg(NO_3)_2$] avec 15 % de N, 46 % de la CaO et 80 % de MgO et le Nitrate de Potassium (KNO_3) avec 18 % de N et 46 % de K_2O .

Les engrais nitriques sont vendus sous forme granulée et utilisés en culture spéciale. On les emploie généralement en cours de végétation, au moment où la culture est en pleine croissance.

2.4.2.2. Engrais ammoniacaux

Les engrais ammoniacaux quant à eux, fournissent de l'azote sous forme ammoniacale (NH_4^+). Le sulfate d'ammoniaque [$(NH_4)_2SO_4$] avec 21 % de N et 61 % de SO_3 et l'ammoniac anhydre (NH_3) avec 82 % de N sont les représentants ce groupe. L'ammoniac anhydre est injecté dans le sol.

2.4.2.3. Engrais ammoniaco-nitrique

Les engrais ammoniaco-nitriques contiennent de l'azote sous les formes ammoniacales et nitriques, d'où le nom ammonitrates. Les ammonitrates sont des engrais simples les plus utilisés en raison de leur teneur élevée en azote, de leur bonne conservation, de leur facilité d'emploi et de leur efficacité agronomique due à leur composition (mi-nitrique, mi-ammoniacale) (Schvartz *et al.*, 2005). Ils sont habituellement sous forme granulée et sont disponibles sous deux dosages : ammonitrates à 27 % ou 33,5 % de N. Les ammonitrates enrichis en SO_3 et/ou MgO ont des dosages de 25 à 28 % de N, 20 à 35 % de SO_3 et 8 % de MgO .

2.4.2.4. Autres formes

Les autres formes engrais contenant de l'azote sont sous diverses formes. Ils sont sous forme d'urée [$CO(NH_2)_2$] avec 46 % N, c'est un engrais azoté solide et plus concentré, souvent sous forme granulé. Ils sont aussi sous forme de solution azotée et de cyanamide calcique (CN_2Ca) avec 18 à 21 % de N. Ils sont peu utilisés, mais généralement employées en couverture sur les cultures en cours de végétation (Schvartz *et al.*, 2005).

2.4.3. Engrais NPK

2.4.3.1. Origine et importance du NPK

Les engrais NPK représentent une formule classique de fertilisant qui correspond à l'abréviation des éléments chimiques qui les composent, à savoir azote, phosphore, potassium (ANADER, 2015). Wilhelm KNOP, chimiste agricole allemand, a déterminé en 1861, les

besoins nutritifs précis des plantes vertes nécessaires à leur croissance. Il s'agissait de quatre éléments correspondant aux lettres de son patronyme (OFEV & OFAG, 2012).

- Potassium (K) ;
- Azote (N) ;
- Oxygène (O) ;
- Phosphore (P).

Hormis l'oxygène, les trois composants sont devenus la base des engrais chimiques sous forme de sels solubles directement assimilables, permettant d'obtenir de gros rendements, mais avec des risques importants de lessivage vers les nappes phréatiques et les cours d'eau (N'dah, 2012).

L'Azote (N) favorise la pousse des parties vertes de la plante (tiges et feuilles), leur précocité et leur développement. Le Phosphore (P) joue sur la formation des fleurs et des graines et sur le développement racinaire. Il renforce la résistance naturelle des plantes aux agressions. Le Potassium (K) par contre, permet la floraison et le développement des fruits et de tous les organes de réserve tels que les racines et les tubercules. La coloration des fleurs et des fruits est améliorée, ainsi que la résistance aux maladies (OFEV & OFAG, 2012).

2.4.3.2. Formes commercialisées et limites du NPK

Les formes sous lesquelles l'engrais NPK est commercialisé pour le potager et le jardin intègrent des proportions adaptées aux différentes espèces végétales (ANADER, 2015).

Selon le principe d'une codification internationale, les emballages des engrais vendus dans le commerce comportent la mention NPK suivie de trois chiffres :

Exemple : NPK 15-5-10 indique un engrais contenant 15 % d'Azote, 5 % de Phosphore et 10 % de Potassium.

Un engrais est dit équilibré lorsque les 3 chiffres NPK sont égaux, par exemple : NPK 5-5-5. Il contient alors autant d'azote que de phosphore et de potassium.

Les engrais chimiques qui ne comprennent que les NPK sont incomplets, car leurs effets à long terme entraînent des effets néfastes sur l'environnement (eau, air et aliments) et sur la production des cultures (Pierre, 1996 et Grogga *et al.*, 2018).



DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 1 : MILIEU D'ETUDE

1.1. Situation géographique

L'étude a été réalisée dans la ville de Daloa en Côte d'Ivoire, dans la région du Haut-Sassandra, précisément à 6°53 de latitude Nord et 6°27 de longitude Ouest. Cette région a une superficie de 15 200 km² (INS, 2014). La parcelle expérimentale est située au sein de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, précisément à 6°54'32'' de latitude Nord et 6°26'14'' de longitude Ouest (Figure 7).

1.2. Facteurs abiotiques du département de Daloa

1.2.1. Climat et température du département

Le département de Daloa a un climat de type équatorial. Ce département qui se caractérisait autrefois, par une forte pluviométrie de 1 868,5 mm de pluie par an en 1 968, enregistre une baisse de l'ordre de 40 % ces dernières années (Ligban *et al.*, 2009).

Daloa est une zone humide avec un climat à quatre saisons dont la grande saison des pluies (Avril à mi-juillet), la petite saison sèche (mi-juillet à mi-septembre), la petite saison des pluies (mi-septembre à novembre) et la grande saison sèche de décembre à mars (N'Guessan *et al.* 2014). Les saisons sèches et humides alternent avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1300 mm (Brou, 2005). L'hygrométrie de ce département y est importante avec une température moyenne annuelle (Koffie & Kra, 2013) de 26° C (Figure 8).

1.2.2. Hydrographie du département

Au plan hydrographique, le département de Daloa est sous l'influence de celle de la région du Haut-Sassandra (Koffie & Kra, 2013). Le département est donc arrosé par le fleuve Sassandra et ses affluents puis le lac du barrage de Buyo. En outre, de nombreux cours d'eaux à écoulement saisonnier tel que le Dé, le Bahoré et le Boty arrosent le département, donnant lieu à de nombreux bas-fonds cultivables. Ces conditions naturelles favorables ont eu pour conséquence une forte implantation de population (Sangaré *et al.*, 2009 ; Koffie & Kra, 2013).

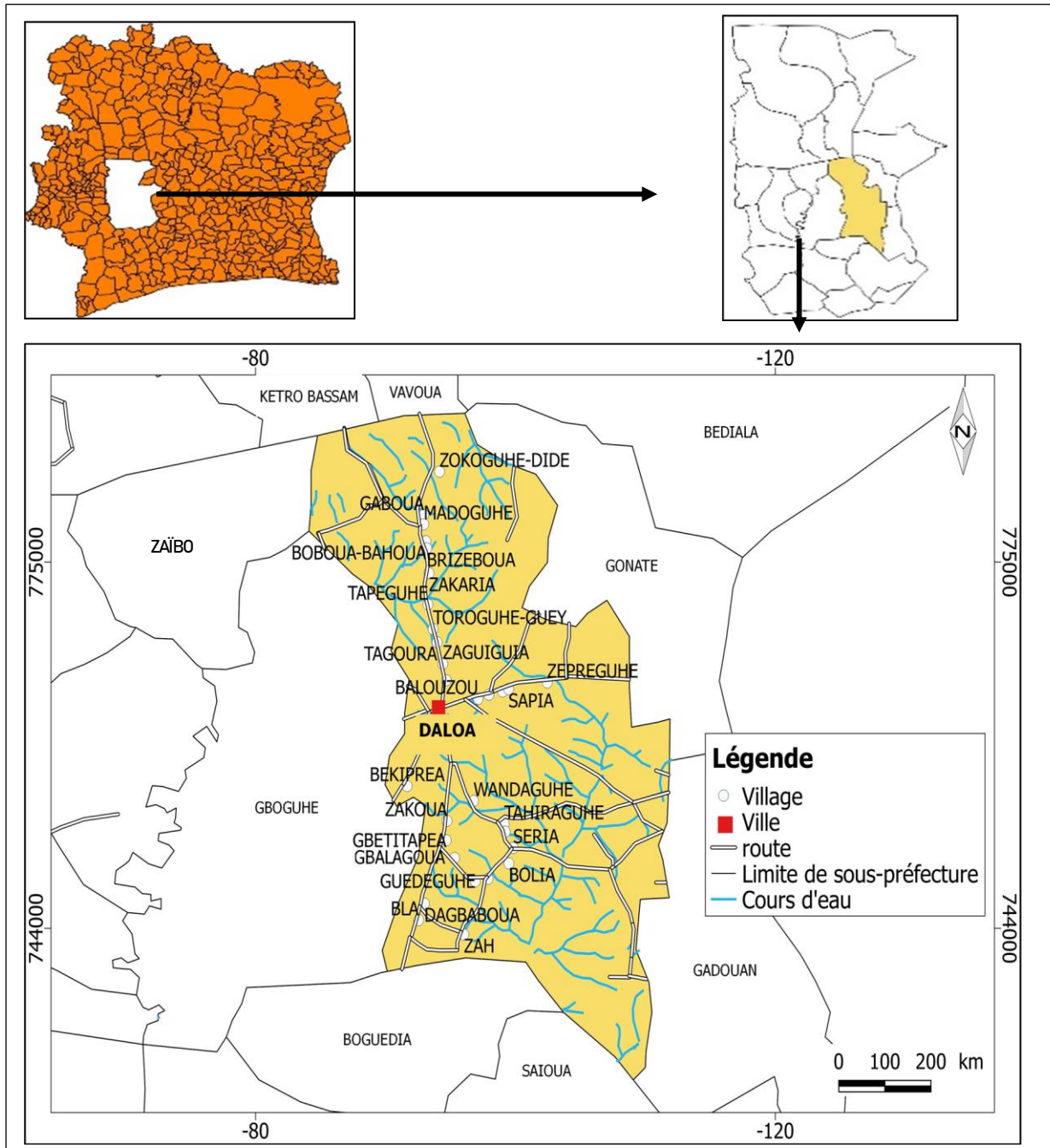


Figure 7 : Carte de la zone de l'étude (Kouakou, 2019).

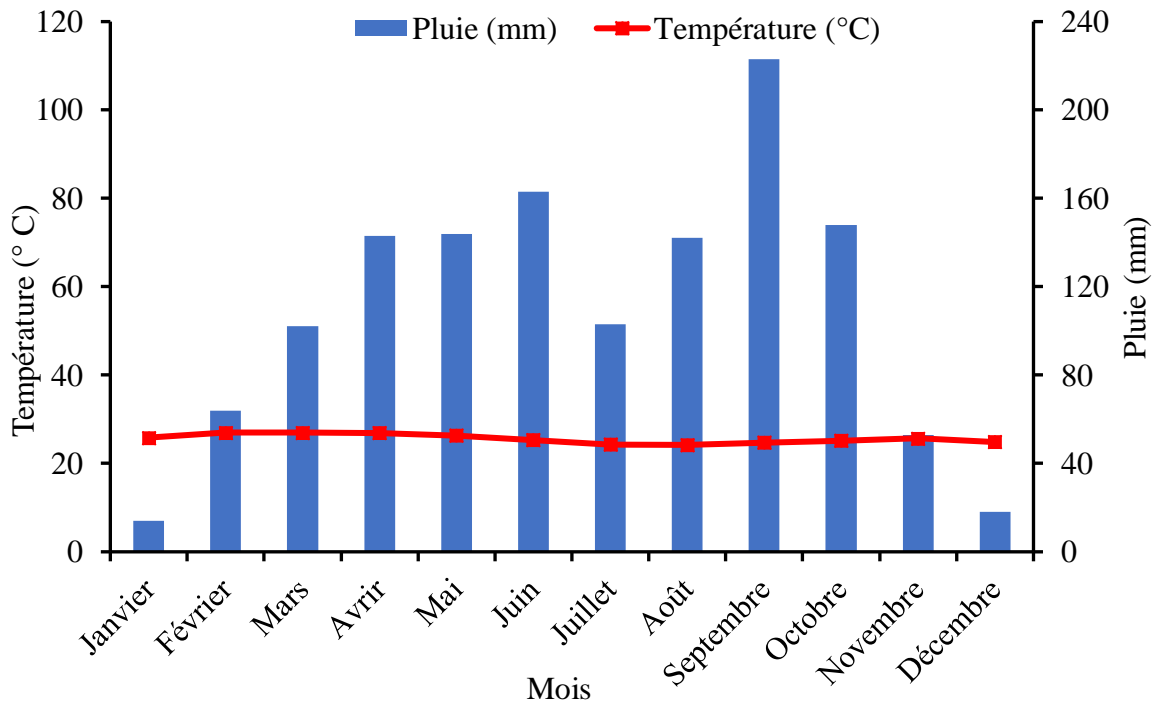


Figure 8 : Diagramme ombrothermique du département de Daloa de 1986 à 2016 (Source de données : www.fr.climate-data.org)

1.2.3. Sols du département

Le sol du département est issu de l'altération du vieux socle précambrien. La faiblesse de l'érosion du sol justifie la présence continue du couvert végétal et rend le sol très profond en général, avec le dépôt actif de l'humus. Il s'agit des sols ferrallitiques d'origine granitique moyennement à faiblement dénaturés. A côté des sols ferrallitiques, les classes de sols les plus représentées sont les sols peu évolués (d'apport alluvial, et/ou colluvial) et les sols hydromorphes. Les sols de composition ferrallitique présentent de bonnes aptitudes agricoles et se prêtent à tous les types de cultures (Koffie & Kra, 2013).

1.3. Facteurs biotiques du département de Daloa

1.3.1. Végétation du département

La végétation du département de Daloa est inféodée à celle de sa région (Haut-Sassandra). Cette végétation se caractérise par une flore très variée et présente deux types de végétations bien distinctes. On peut distinguer :

- La zone forestière qui occupe la majeure partie de la région. Elle se caractérise par une forêt semi-décidue à *Celtis spp* et *Triplochiton scleroxylon* (samba) ;
- La zone des savanes ou savane préforestière. La composition de ces savanes diffère en fonction de la nature du sol ou de l'action de l'homme. Ainsi, on trouve des savanes à rôniers sur les sols hydromorphes, des savanes herbeuses post culturales ou des savanes alluviales sur les bordures du fleuve Sassandra et enfin, des savanes arbustives (Koffie & Kra, 2013).

La presque totalité du bassin du département se trouve en zone tropicale humide avec une végétation de forêt dense à évolution régressive. La dégradation de cette forêt est accélérée par l'intensification des cultures de rente (cacaoyer, caféier, palmier à huile et hévéa). Les pratiques culturales extensives et itinérantes et l'exploitation non contrôlée des essences forestières ont notamment fait reculer les limites de cette forêt (Sangaré *et al.*, 2009).

1.3.2. Faune du département

Au sein des différents écosystèmes terrestres de la Côte d'Ivoire se développe une multitude d'espèces fauniques. La faune terrestre est caractérisée par une richesse et une diversité biologique importantes. Elle compte 11 embranchements d'animaux répartis en 74 ordres, 203 familles, 731 genres et 6994 espèces (Dufour *et al.*, 2015).

A l'instar des autres zones forestières et de savanes de la Côte d'Ivoire, le département de Daloa regorge dans sa composition faunistique des invertébrés et des vertébrés. Les invertébrés

sont composés de façon générale des nématodes, des annélides, des oligochètes, des mollusques, des arthropodes, des arachnides, des myriapodes, des crustacés et des insectes (Lévêque, 1999 ; Dufour *et al.*, 2015 ; MINEF, 2014). Quant aux vertébrés, ils sont composés des poissons, des amphibiens, des reptiles, des oiseaux et des mammifères (Chippaux, 2006 ; Chirio & Lebreton, 2007 ; Dufour *et al.*, 2015). Autrefois, le département était riche en animaux sauvages avec la présence des antilopes (d'où provient le nom de la "cité des antilopes"). Aujourd'hui, du fait de la pression humaine sur les ressources forestières et animales, la présence de ces animaux a été considérablement réduite (Dufour *et al.*, 2015).

1.3.3. Population et activités humaines du département de Daloa

Le département de Daloa dispose d'une population estimée à 1.430.960 habitants (INS, 2014) en majorité rurale. Le peuplement est constitué essentiellement de Bété, de Niamboua, de Zombo et une partie de Niédéboua, de divers allogènes et d'étrangers. En 2012, la ville de Daloa comptait 261 789 habitants pour une superficie de 5,305 km². Elle est la 3^{ème} ville la plus peuplée de la Côte d'Ivoire après Abidjan et Bouaké, et devant Yamoussoukro (Koffie & Kra, 2013). Selon le RGPH-1998, la population rurale de la région était de 798 190 habitants soit 74,46 % de la population régionale. En 2010, la population rurale est estimée à 1 099 800 habitants, soit 71,69 % de la population régionale contre 57 % au plan national (Koffie & Kra, 2013).

Situé dans le centre-ouest de la Côte d'Ivoire, dans la région du Haut-Sassandra, Daloa bénéficie des conditions naturelles favorables pour un bon développement agricole (MINAGRI, 2010 ; Adou, 2012). Aussi, cette région bénéficie de nombreux atouts non seulement pour la production du vivrier mais aussi pour la commercialisation des produits du cacaoyer et caféier du pays (Adou, 2012).

En effet, les activités économiques dans cette zone sont assez diversifiées. Cependant, l'agriculture occupe la majorité des populations et reste la principale activité génératrice de revenu. Car, la dynamique agricole est basée essentiellement sur les cultures de rente pérennes (caféier, cacaoyer, hévéa, palmier à huile), les cultures vivrières et les maraîchers. Le système agricole au départ extensif, évolue aujourd'hui vers une agriculture beaucoup plus intensive du fait de la raréfaction des terres cultivables (Brou, 2005). L'élevage est une activité secondaire de la région.

CHAPITRE 2 : MATERIEL

2.1. Matériel végétal

2.1.1. Tomate de variété Boomerang F1

La tomate de variété Boomerang F1 (Figure 9) a été utilisée dans cette étude. C'est une variété de tomate améliorée en provenance du centre de production semencier TECHNISEM, distribuée par la société SEMIVOIRE. Il s'agit d'une variété à croissance indéterminée, d'excellente vigueur et à production précoce (70 jours après repiquage). En outre, cette variété a été choisie pour son haut rendement d'environ 24 t / ha, sa qualité gustative et sa disponibilité.

2.1.2. Fougère *Azolla sp*

La fougère *Azolla sp* utilisée dans ce travail est constituée essentiellement de deux espèces: *Azolla filiculoïdes* et *Azolla caroliniana* (Figure 10). Ces deux espèces ont été choisies pour leur présence dans le département de Daloa et leur capacité à se multiplier.

2.2. Matériel fertilisant

2.2.1. Fertilisants organiques

Les biofertilisants utilisés pendant l'expérimentation sont constitués de la fougères *Azolla caroliniana* et du compost.

2.2.1.1. *Azolla caroliniana*

Deux espèces de fougère *Azolla sp* ont été cultivées pendant l'expérimentation, mais c'est *Azolla caroliniana* qui a été utilisée comme fertilisant pour nourrir les plants de tomate. Le choix de *Azolla caroliniana* se justifie par le fait qu'elle se caractérise par une productivité élevée par rapport à *Azolla filiculoïdes*.

2.2.1.2. Compost à base de produits organiques

Le compost a été choisi pour la disponibilité en éléments qui entrent dans sa production et sa capacité à améliorer la texture du sol. Les éléments utilisés pour produire le compost dans cette étude se composent de :

- fiente de poulet (un sac de 120 kg) ;
- sciure de bois blanc de Samba (un sac de 120 kg) ;
- charbon de bois (un sac de 120 kg) ;

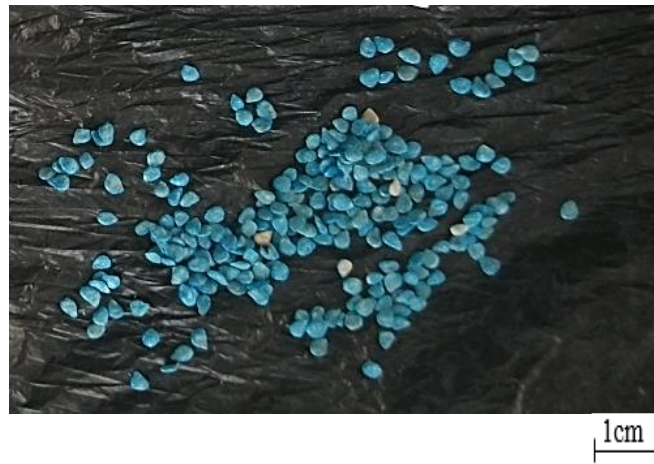


Figure 9 : Semences de tomate de la variété Boomerang F1

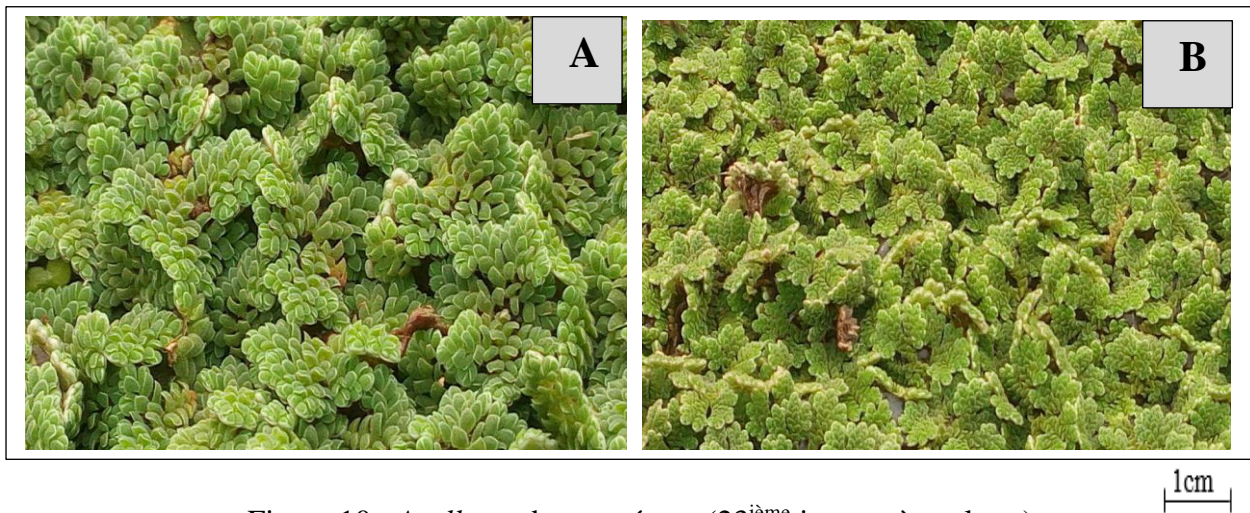


Figure 10 : *Azolla sp* dans un étang (23^{ième} jour après culture)

A : *Azolla caroliniana* ; B : *Azolla filiculoides*

- parche de café (un demi sac de 120 kg).

2.2.1.3. Déchets de ferme

Les déchets de ferme utilisés dans cette étude sont constitués de 1 kg de bouse de vache et de 1 kg de fiente de poulet (Figure 11). Ces deux substrats sont riches en éléments nutritifs pouvant servir de fertilisant en agriculture.

2.2.2. Fertilisants Chimiques

Le fertilisant chimique est constitué de l'engrais minéral NPK (Figure 12) contenant 10 % d'azote, 18 % de phosphore et 18 % de potassium et l'urée, commercialisés en Côte d'Ivoire. Ce sont les engrais utilisés en générale dans la culture de tomate (ANADER, 2015).

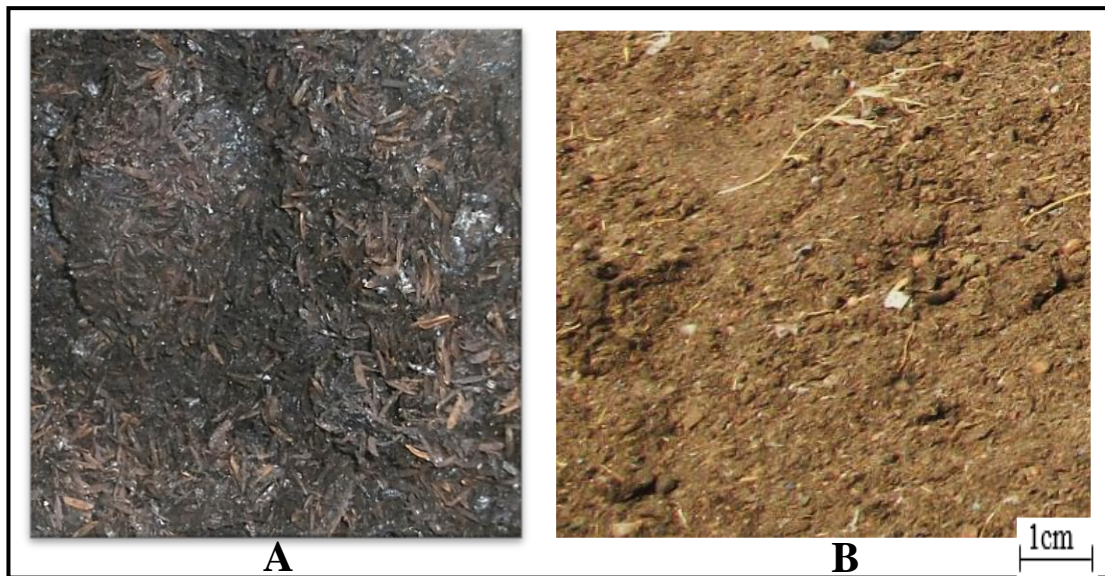


Figure 11 : Déchets de ferme

A : Fiente de poulet ; B : Bouse de vache



Figure 12 : Engrais minéral NPK (SOLEVO)

CHAPITRE 3 : METHODES

3.1. Production de la fougère *Azolla* (*A. caroliniana* et *A. filiculoides*) à l'aide de la bouse de vache et fiente de poulet

3.1.1. Préparation des filtrats

3.1.1.1. Préparation du filtrat à base de bouse de vache

La bouse de vache provient d'un troupeau situé à environ 2 km du champ d'expérimentation. Une quantité de 1 kg de la bouse de vache prélevée et mise dans un pot de cinq litres à laquelle trois litres d'eau ordinaire (eau de robinet) ont été ajoutées. Le contenu ainsi obtenu a été laissé au repos durant un jour, puis filtré avec un filet de maille 0,2 cm (Figure 13). Le liquide ainsi obtenu est le filtrat de la bouse de vache qui sera ensuite analysé puis utilisé pour la culture de *Azolla caroliniana*.

3.1.1.2. Préparation du filtrat à base de fiente de poulet

La fiente de poulet provient d'une ferme avicole située au sein de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa. Une quantité de 1 kg de fiente prélevée est mise dans un pot de 5 litres à laquelle 3 litres d'eau ordinaire (eau de robinet) ont été apportées. Le contenu ainsi obtenu a été laissé au repos durant un jour, puis filtré avec un filet de maille 0,2 cm. Le liquide ainsi obtenu est le filtrat de la fiente de poulet (Figure 13). Ce filtrat sera ensuite analysé puis utilisé pour la culture de *Azolla*.

3.1.2. Détermination de la composition minérale des filtrats

La détermination des compositions chimiques des échantillons de filtrat a été réalisé selon la méthode de IITA (1981). Deux types d'analyses ont été utilisées pour la quantification des minéraux. Ce sont :

- analyse à la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)
- analyse à la Spectrophotométrie UV visible

3.1.2.1. Analyse par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)

Les minéraux (K, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn et Na) ont été déterminés à l'aide d'un Spectrométrie d'Absorption Atomique (SPECTR AA20 Varian, Australie). La SAA repose sur un phénomène basé sur l'absorption où l'émission d'un rayonnement à des longueurs d'ondes variant de 200 à 753 nm, caractéristique d'un élément (Gueu, 2007 ; Kouassi *et al.*, 2013).

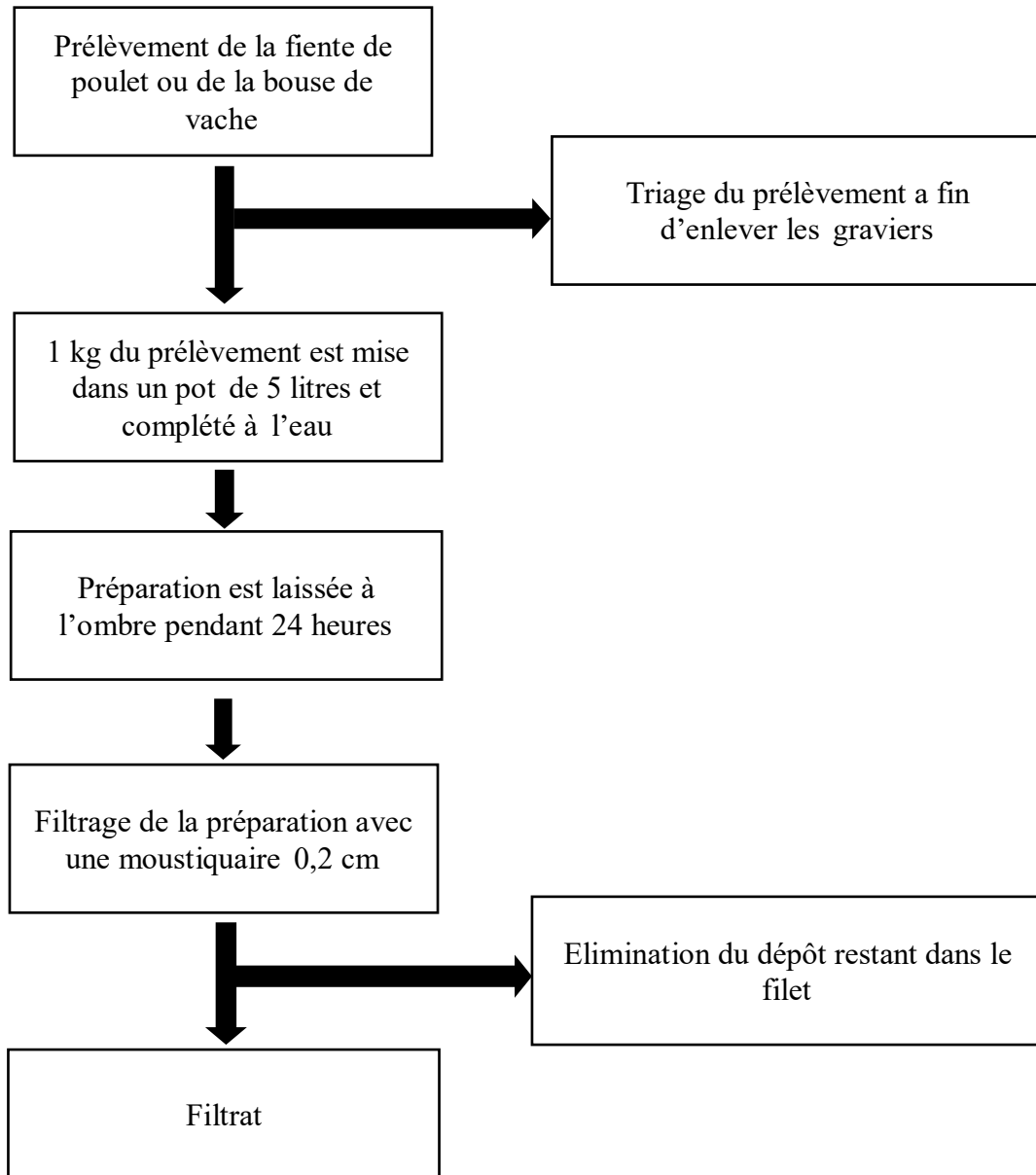


Figure 13 : Schéma simplifié de la préparation du filtrat

Généralement le dosage se fait à une longueur d'onde correspondant à un maximum d'absorption ou d'émission. Des mesures d'absorbance de solutions étalons 5 L préparées à partir de solutions standard permettent de relier la concentration à l'absorbance d'après la relation de Beer-Lambert :

$$\text{Absorbance} = k \times C$$

Où k est le coefficient d'absorption propre à chaque élément. Il dépend de la longueur d'onde choisie. C présente la concentration de la solution standard choisie

3.1.2.2. Analyse par Spectrophotométrie UV visible

Le dosage des minéraux (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} et SO_4^{2-}) a été réalisé à l'aide d'un Spectrophotomètre UV visible (UV2101PC). Le spectrophotomètre à double faisceaux couplé avec un microordinateur a permis de déterminer les concentrations desdits minéraux à partir d'une gamme d'étalon. Par ailleurs, la spectrophotométrie UV-visible est une technique analytique fondée sur l'étude du changement de l'intensité de la lumière traversant une solution colorée, dans un domaine d'application comprise entre 200 et 753 nm (Koko, 2012).

3.1.3. Culture de *Azolla sp*

3.1.3.1. Echantillonnage des fougères

Les fougères *Azolla* (*A. filiculoïdes* et *A. caroliniana*) qui ont servi de souche dans le cadre de cette étude, ont été récoltées dans la zone rizicole de Daloa, située sur l'axe Daloa - Man (zone de BATAR 1&2) entre $06^{\circ}87$ N et $006^{\circ}48$ W. Les fougères *Azolla sp* au stade de maturité ont été prélevées à l'aide d'une passoire de 0,5 cm de diamètre des mailles et conservées selon l'espèce dans des bacs en plastiques contenant de l'eau à une hauteur de 15 cm. Ces bacs en plastiques de 16 000 cm^3 ont servi au transport de la fougère du lieu de récolte au site expérimental.

3.1.3.2. Mise en place de la culture

✓ Confection des bacs

La mise en culture de ces deux espèces de *Azolla* (*A. filiculoïdes* et *A. caroliniana*) a été réalisée dans six bacs de 1 m^2 de surface chacun et de 30 cm de profondeur, confectionnés à l'aide de planches et de contre plaqués, recouverts de sachet plastique pour le maintien de l'eau. Un espace d'une superficie de 10 m^2 a été aménagé pour accueillir ces bacs. Les bacs ont été

surélevés par des supports, afin d'éviter d'éventuelles attaques de termites et de rongeurs (Figure 14).

✓ Conduite de la culture de *Azolla sp*

L'analyse de la composition minérale des filtrats de bouse de vache et de fiente de poulet et des expériences préliminaires, nous ont permis de déterminer la quantité de filtrat à utiliser pour une production optimale de fougère.

Ainsi, le milieu de culture réalisé dans chacun des bacs, a contenu un volume de 75 litres d'eau ordinaire et cinq litres du filtrat de la fiente de poulet ou de filtrat de bouse de vache (Groga *et al.*, 2018). A ces éléments, une quantité de 100 g du matériel végétal ; *Azolla caroliniana* ou *Azolla filiculoides* frais, préalablement collecté sur le site rizicole de Daloa, a été associée. Chaque bac a été protégé par un filet pour éviter que les grenouilles viennent déposer leurs œufs. Trois bacs ont été utilisés pour chacune des espèces de *Azolla sp*.

3.1.4. Récolte de *Azolla sp*

Après un temps de 15, 23 et 29 jours après ensemencement, des récoltes de *Azolla sp* ont été faites dans les différents milieux de culture. La récolte de la fougère *Azolla sp* s'est faite dans les différents bacs en fonction de la durée de culture. Trois bacs ont servi à la culture de *A. caroliniana* et trois autres à la culture de *A. filiculoides*. Après 15, 23 et 29 jours de mise en culture dans les différents bacs, tout le matériel végétal (*Azolla sp*) a été récolté à l'état frais, à la main, puis à l'aide d'une passoire (Figure 15).

3.1.5. Masse de *Azolla* produite

Le paramètre de production mesuré est la masse de la colonie obtenue suite à la mise en culture de 100 g de fougère initiale. Après une mise en culture de 15, 23 et 29 jours de la fougère *Azolla sp* (100 g de fougère initiale), la récolte a été effectuée, puis le poids de la fougère pesé. Avant chacune des pesées, le matériel végétal a été conservé à l'ombre pendant 1/4 heure dans une passoire afin d'éliminer le surplus d'eau contenue dans la récolte.

3.2. Effet des fertilisants biologiques de *Azolla caroliniana* et du compost sur la culture de tomate

Après la phase de production des deux espèces *Azolla* (*A. caroliniana* ou *A. filiculoides*), seule la fougère *Azolla caroliniana* et le compost de sciure de bois ont été utilisés pour la suite de cette étude.



Figure 14 : Bacs de culture de la fougère *Azolla*

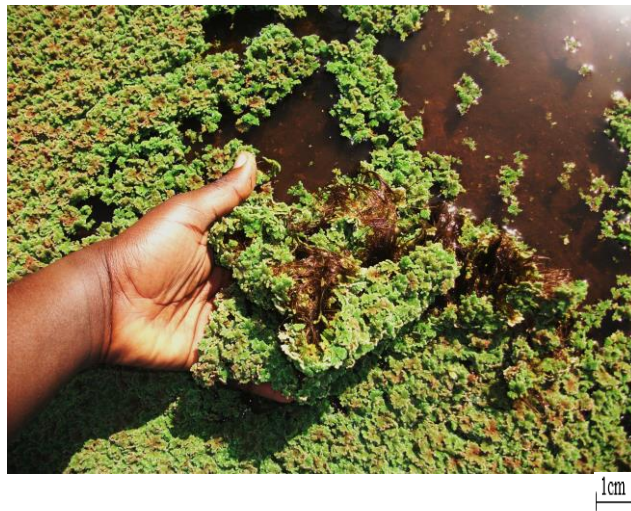


Figure 15 : Récolte de la fougère *Azolla*

Les effets des biofertilisants (*Azolla sp* et compost) sont testés d'abord sur la tomate en pépinière, puis après repiquage au champ, en comparaison au fertilisant chimique (NPK).

3.2.1. Préparation de *Azolla* liquide

Pour un bon épandage et une bonne utilisation des minéraux, *Azolla caroliniana* a été utilisé sous forme liquide. Une quantité de 5 kg de *A. caroliniana* ont été prélevée dans les milieux de culture contenant le filtrat de fiente de poulet, pilé et mis dans un bidon de 20 litres (Figure 16). Une quantité de 5 litres d'eau ordinaire a été apportée au milieu. Le bidon a été fermé hermétiquement afin d'éviter l'entrée d'air. Pour éviter que le bidon n'explode à cause de la pression d'air interne, une valve de chambre à air a été insérée dans la fermeture du bidon. La préparation a été exposée à l'ombre pendant 21 jours, pour être utilisée en tant que biofertilisant liquide (Inckel *et al.*, 2005).

3.2.2. Préparation du compost

Le compost (Figure 17) utilisé pour cette étude a été préparé à base de fiente de poulet, sciure de bois blanc de *Triplochiton scleroxylon* (Samba), parche de café, et du charbon de bois. Les travaux ont nécessité 1 sac (sac de 120 kg) de fiente de poulet, 1 sac (sac de 120 kg) de sciure de bois blanc, 1/2 sac (sac de 120 kg) de parche de café, 1 sac (sac de 120 kg) de charbon de bois et 200 litres d'eau. La moitié de chaque quantité de chaque sac a été étalée sur une bâche noire successivement. Un mélange homogène de la quantité étalée sur la bâche a été effectué. L'autre moitié restant de chaque sac a été ensuite ajoutée puis mélangée en y ajoutant l'eau de sorte que tout le tas soit humide. Le mélange a été par la suite recouvert d'une bâche pendant un (1) mois. Avant l'utilisation du compost, une détermination des compositions physico-chimiques a été réalisée selon la méthode de l'IITA (1981).

3.2.3. Effets des biofertilisants sur la culture de la tomate en pépinière

3.2.3.1. Mise en place de la pépinière

La pépinière a été réalisée dans des alvéoles. Une quantité de 12 alvéoles de 54 creux ont servi à la mise en place de la pépinière.

Un dispositif en randomisation totale a été utilisé pour évaluer l'effet des différents fertilisants en pépinière de tomate (Figure 18). Ce dispositif expérimental était constitué de quatre traitements de trois répétitions représentées par 12 alvéoles. Les quatre traitements étaient constitués de *A. caroliniana*, du compost, du NPK et du témoin (constitué de la couche arable du



Figure 16 : Dispositif de la préparation de *Azolla* liquide



Figure 17 : Compost prêt à être utilisé

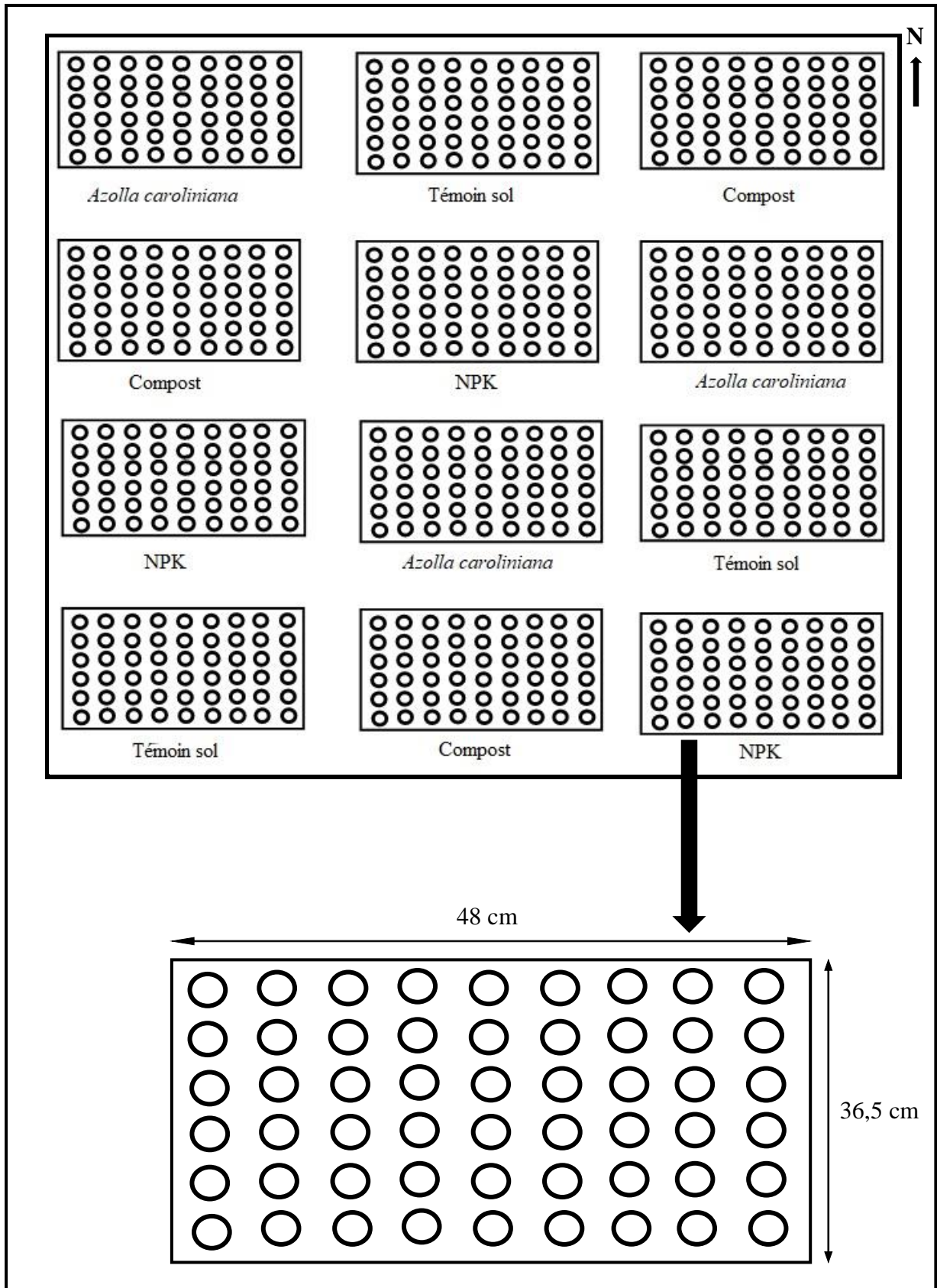


Figure 18 : Dispositif expérimental de la culture de la tomate en pépinière

sol de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa). Chaque traitement comporte 54 creux. Chaque creux a reçu 2 graines. Après le semis, la pépinière a été arrosée régulièrement avec trois litres d'eau robinet (eau courante) par jour.

3.2.3.2. Paramètres mesurés

Les différents paramètres mesurés ont été effectués au 18^{ième} jour après semis.

✓ Hauteur des plants

La hauteur des plantes a été mesurée à l'aide d'une règle graduée. Les hauteurs ont été prises sur la tige à partir de la surface du substrat jusqu'à l'apex du plant. Elle permet de définir l'amendement qui favorise le plus la croissance en hauteur de la tige principale des plants de tomate

✓ Diamètre au collet

Le diamètre au collet des plantes a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. Les mesures ont été prises au ras du sol à la base de la tige des plants.

3.2.4. Effets des biofertilisants sur la culture de la tomate au champ

3.2.4.1. Recherche de la dose optimale du fertilisant liquide à base de *Azolla sp*

✓ Doses de *Azolla caroliniana* utilisées

La détermination de la dose optimale du filtrat de *Azolla caroliniana* liquide apportée aux plants, permettra de choisir la dose qui conviendrait pour la suite de l'étude.

Les doses de *Azolla caroliniana* utilisées pour nourrir les plants de tomate sont composées comme suit :

- la dose 0 (D₀) est constituée de l'eau d'arrosage habituel. C'est le Témoin ;
- la dilution 1/10 (D_{1/10}) est constituée d'un litre de fertilisant liquide à base de *Azolla caroliniana* pour 9 litres d'eau ;
- la dilution 1/5 (D_{1/5}) est constituée d'un litre de fertilisant liquide à base de *Azolla caroliniana* pour 4 litres d'eau ;
- la dilution 1/2 (D_{1/2}) est constituée d'un litre de fertilisant liquide à base de *Azolla caroliniana* pour 1 litre d'eau ;
- la dose 1 (D₁) est constituée 1500 g de *Azolla caroliniana* pure ;
- *Azolla sp* (Milieu) est la solution ayant servi à la culture de *Azolla caroliniana*.

Les différentes doses préparées selon Temgoua *et al.* (2017) ont été utilisées pour fertiliser la parcelle expérimentale, afin de déterminer la dose optimale à appliquer aux plants de tomate.

✓ Dispositif expérimental

Pour la recherche du facteur de dose du fertilisant liquide *Azolla caroliniana*, un dispositif expérimental en bloc aléatoire a été mis en place. Ce dispositif était constitué de six traitements à trois répétitions (Figure 19). Les six traitements sont représentés par les différentes doses de *Azolla caroliniana* (D₀, D₁, D_{1/2}, D_{1/5}, D_{1/10} et milieu de culture de *Azolla sp.*).

Chaque bloc est constitué de six planches de 6 m². Une allée de 2 m de largeur a été respectée entre les planches d'un même bloc et entre les différents blocs.

✓ Repiquage des plants de tomate

Après 21 jours en pépinière dans les alvéoles, les plants issus de chaque traitement ont été arrachés à la main pour être repiqués sur planches préparées à recevoir le même traitement. Ainsi, les plants arrachés ont été repiqués sur 2 lignes à raison de 0,6 m entre les lignes et 0,4 m sur la ligne, soit 30 plants de tomate par planche.

✓ Fertilisation des planches

Les différentes doses de *A. caroliniana* (D₀, D_{1/10}, D_{1/5}, D_{1/2} et *Azolla* milieu) réalisées ont été apportées deux fois par planche. Une quantité de 0,20 L de chaque dose a été apportée par pied de tomate. Les différents apports ont été faits comme suit :

- le 1^{er} apport a été fait 3 jours après repiquage ;
- le 2^{ème} apport a été fait 21^e jour après repiquage.

Quant à la dose 1 (fougère *Azolla* pure), 25 grammes de la fougère *A. caroliniana* sont apportés par plant de tomate au 3^{ième} et au 21^{ième} jours après repiquage de la tomate.

✓ Paramètres évalués

Les paramètres suivants ont été évalués : la date d'apparition des boutons floraux, des fleurs épanouies et des fruits des plants de tomate. Pour chaque traitement, 30 plants de tomate jugés vigoureux et bien épanouies (les plus grands, les feuilles bien épanouies et en bonne santé) ont été sélectionnés pour les prises de données.

Les paramètres ont été mesurés dès l'apparition des premiers boutons floraux. Après la première prise de donnée, tous les trois jours, des collectes de données ont été effectuées jusqu'au 97^{ième} jour après semis.

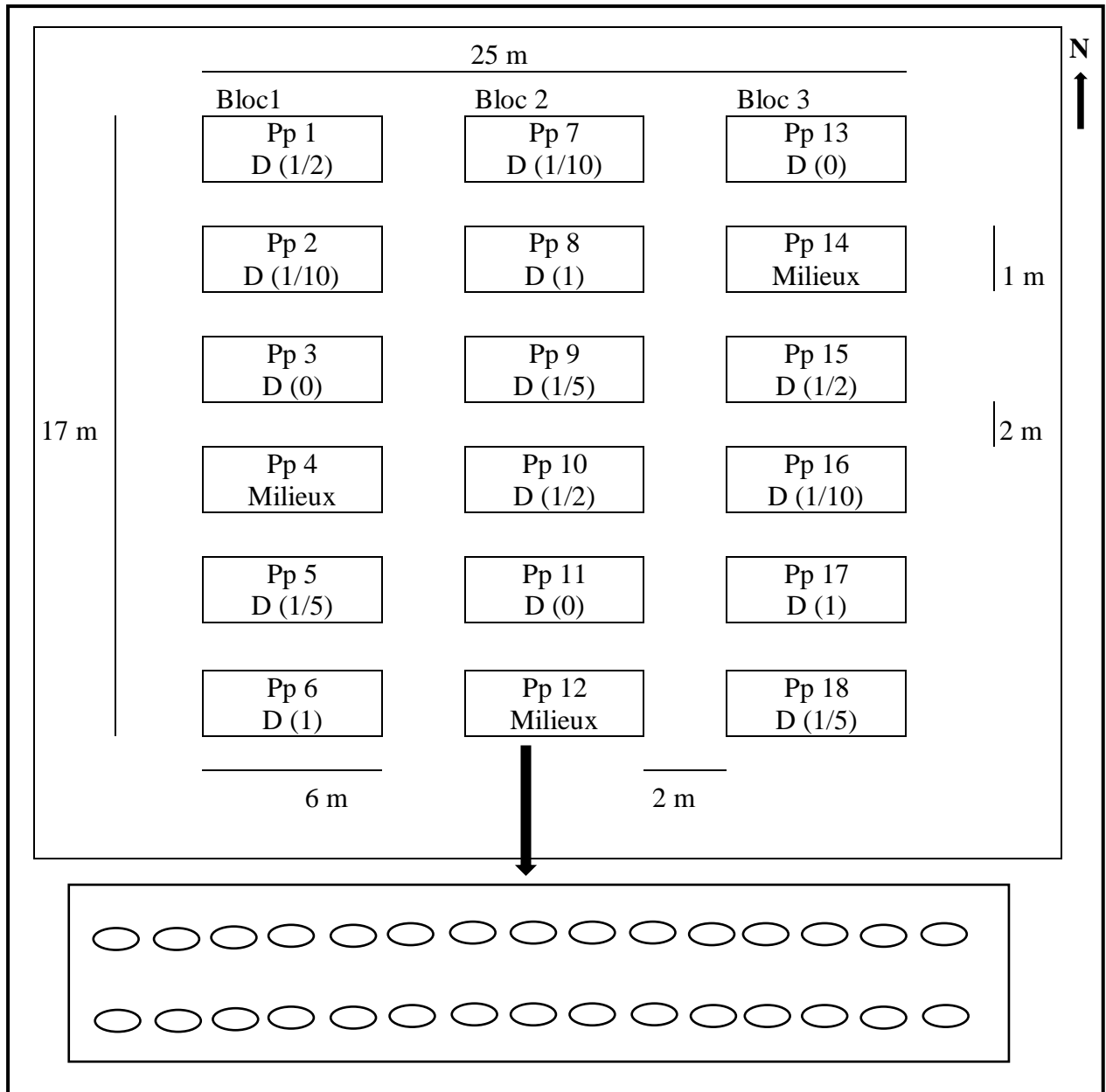


Figure 19 : Dispositif expérimental pour la recherche de la dose optimale du filtrat de *Azolla caroliniana* sur la production de la tomate

Pp : Plaque à production, D (0) = Témoin (eau de robinet), D (1) = Filtrat brut, D (1/2) = filtrat dilué au 1/2, D (1/5) = Filtrat dilué au 1/5^{ème}, D (1/10) = Filtrat dilué au 1/10^{ème}, Milieux = solution de culture de *Azolla*

3.2.4.2. Itinéraire technique de la tomate

La recherche optimale de la dose du filtrat de *Azolla caroliniana* permet de choisir une dilution précise pour la suite de l'étude. L'effet de cette dose et du compost sera évalué sur la productivité de la tomate au champ, en comparaison avec les engrais chimiques usuels.

❖ Préparation de la parcelle

✓ Mise en place

La mise en place de la parcelle s'est faite manuellement. La parcelle a été nettoyée à la machette et à la houe. Ensuite, à l'aide d'un râteau, les herbes coupées et dessouchées ont été mises hors de la parcelle. La parcelle a été exposée au soleil durant deux semaines. Après cette durée, 12 planches de 6 m de longueur, de 2 m de largeur et une hauteur de 30 à 35 cm chacune, ont été réalisées sur un espace de 1575 m². La distance entre chaque planche était de 2 m.

✓ Dispositif expérimental

Afin de déterminer l'effet du facteur fertilisant de *Azolla caroliniana*, du compost et du NPK sur la production de la tomate, une expérimentation a été mise en place. L'expérimentation a été réalisée en bloc à trois répétitions. Chaque répétition a comporté quatre traitements dont deux biofertilisants (*A. caroliniana* et compost), du NPK et du témoin (terre sans fertilisant). Chaque bloc est constitué de quatre parcelles élémentaires est une planche de 12 m² (6 m x 2 m). Une allée de 2 m de large a été observée entre les planches d'un même bloc et autour du bloc. Entre deux blocs, une allée de 2 m a été aussi laissée (Figure 20).

✓ Entretien

L'entretien de la parcelle a porté sur le désherbage. Le désherbage a été effectué chaque trois semaines, juste après le repiquage des plants de tomate.

Pendant toute la période culturale, le champ expérimental a été arrosé deux fois par jours (matin et soir), avec une quantité d'environ 36 litres d'eau de robinet par parcelle, soit en moyenne deux litres d'eau par plant par jour.

❖ Repiquage des plants de tomate

Le mode de culture choisi est la culture sur planche. Après 21 jours en pépinière dans les alvéoles, les plants issus de chaque traitement ont été arrachés à la main pour être repiqués sur planches préparées à recevoir le même traitement. Les plants ont été repiqués sur trois lignes à raison de 0,6 m entre les lignes et 0,4 m sur la ligne, soit 45 plants de tomate par planche.

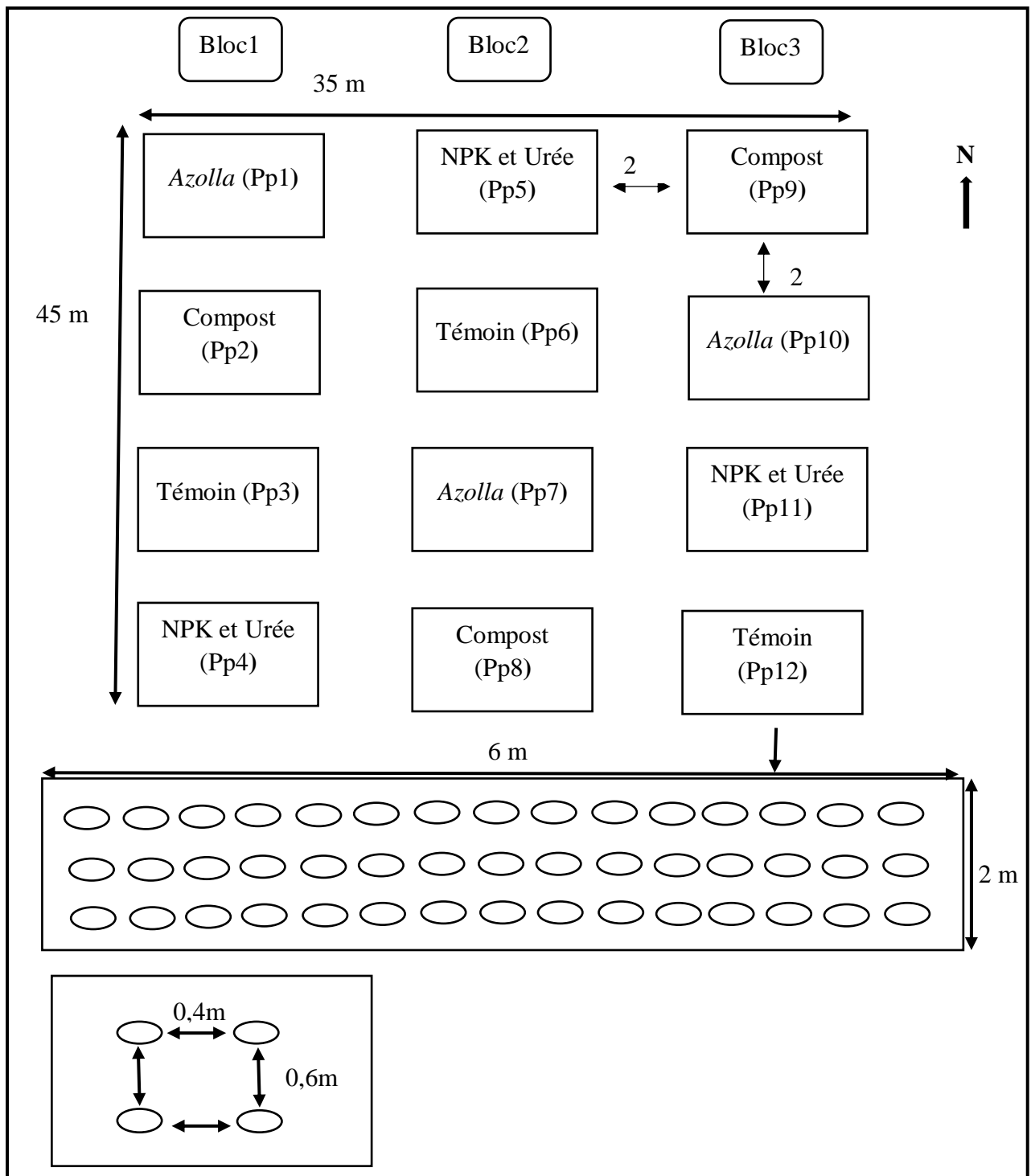


Figure 20 : Dispositif expérimental d'évaluation des différents traitements sur la production de la tomate

Pp1 - Planche à production 1 ; Pp2 - Planche à production 2 ; Pp3 - Planche à production 3 ; Pp4 - Planche à production 4 ; Pp5 - Planche à production 5 ; Pp6 - Planche à production 6 ; Pp7 - Planche à production 7 ; Pp8 - Planche à production 8 ; Pp9 - Planche à production 9 ; Pp10 - Planche à production 10 ; Pp11 - Planche à production 11 ; Pp12 - Planche à production 12

❖ Fertilisation des planches

La fertilisation a été faite avec les engrais biologiques (*Azolla caroliniana* et le compost) et les engrais chimiques usuels que sont le NPK et Urée (Annexe 4). Le NPK associé à l'Urée et couche arable sans fertilisant sont utilisés comme témoin, pour comparer l'effet des engrais biologiques (*A. caroliniana* et le compost).

✓ Apport de NPK et Urée aux planches

Le NPK (10-18-18) a été utilisé à raison de 240 g pour le cycle total de la plante sur les planches (Pp 4, Pp 5, Pp 11) en deux apports.

Le 1^{er} apport a été effectué deux jours avant repiquage à raison de 105 g sur la parcelle (Pp 4, Pp 5, Pp 11).

Le 2^e apport a été fait deux semaines après repiquage de la tomate à raison de 3 g par pied, soit 135g sur la parcelle (Pp 4, Pp 5, Pp 11).

L'urée fractionnée a été apporté au début de la floraison à raison de 200 g sur la parcelle (Pp 4, Pp 5, Pp 11) soit 100 kg/ha.

✓ Apport de *Azolla sp* liquide aux planches

La dilution de moitié de l'extrait *Azolla caroliniana* a été choisie comme la meilleure dose d'apport de *Azolla sp* liquide. Cette dose a été apportée 2 fois aux plants, au cours de son développement.

Une quantité de 0,20 litre de l'extrait de *Azolla caroliniana* dilué au 1/2 a été apportée par pied de tomate, par apport. Les différents apports ont été réalisés sur les planches (Pp 1, Pp 7, Pp 10) comme suit :

- le 1^{er} apport a été fait 3 jours après repiquage de la tomate ;
- le 2^{ème} apport a été fait 21^e jour après repiquage de la tomate.

Ainsi, chaque plant a reçu 0,40 litre de *Azolla sp* liquide au cours de son développement sur la planche.

✓ Apport du compost aux planches

Le compost a été incorporé à raison de 36 kg par planche en deux apports d'après Inckel *et al.* (2005).

- le 1^{er} apport a été fait deux semaines avant repiquage de la tomate. Une quantité de 30 kg de compost a été apportée par planche (Pp 2, Pp 8, Pp 9).

- le 2^{ème} apport a été effectué au repiquage de la tomate ; une quantité de 6 kg de compost par planche (Pp 2, Pp 8, Pp 9) a été apportés.

3.2.4.3. Paramètres évalués

Douze plants (12) de tomate ont été choisis au hasard par parcelle. Les mêmes évaluations ont été faites en grande saison des pluies (Avril à mi-juillet) et en grande saison sèche (décembre à mars).

Les paramètres suivants ont été évalués : la hauteur de la tige, le nombre de feuilles, la longueur des feuilles, le diamètre au collet, le nombre de sarments, le nombre de ramifications, le nombre de bouquets floraux, le nombre de fleurs, le temps de floraison, le temps de production, le nombre de fruits produit et le rendement.

Les observations et mesures des paramètres de croissance ont été effectuées à trois reprises, comme suit :

- Temps témoin (T0) : temps des premières observations et mesures des paramètres de croissance, ce temps correspondant au 35^e jour du cycle végétatif de la tomate.
- Temps 1 (T1) : temps des deuxièmes observations et mesures correspondant au 49^e jour du cycle végétatif de la tomate.
- Temps 2 (T2) : temps des troisièmes observations et mesures correspondant au 97^e jour du cycle végétatif de la tomate.

Les observations et mesures des paramètres de production ont été effectuées chaque semaine à partir du 35^e jour du cycle végétatif de la tomate.

✓ Hauteur de la tige

La hauteur de la tige a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban. Les mesures de la hauteur ont été faites sur la tige principale à partir de la surface du sol jusqu'à l'apex du plant. Elle permet de définir le fertilisant qui offre les meilleures hauteurs de la tige principale (Annexe 3).

✓ Longueur des feuilles

La mesure s'est effectuée sur la feuille grâce à un mètre ruban souple, entre le bout de la foliole terminale et le point de fixation du pétiole sur la tige (Annexe 3). Cette mesure concerne la 3^{ème} feuille épanouie à partir de l'apex de la tige principale vers le sol (haut vers le bas).

✓ Nombre de ramification

C'est le nombre de tiges secondaires ou branches qui se développent sur la tige principale.

Ces mesures ont été effectuées trois fois durant le développement de chaque plant.

✓ **Diamètre au collet**

Le diamètre au collet a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. Les mesures ont été faites au ras du sol, à la base de la tige des plants. Ces mesures ont été effectuées trois fois durant le développement de chaque plant (Annexe 3).

✓ **Nombre de bouquets floraux**

C'est le nombre de grappes portant des boutons floraux qui se développent sur tout le végétal. Ces mesures ont été effectuées chaque semaine dès les premières apparitions de bouton floral sur un végétal, soit trois semaines après repiquage jusqu'à l'apparition des premiers fruits.

✓ **Temps de floraison et nombre de fleurs**

Le temps de floraison est le temps depuis le repiquage, jusqu'à l'apparition des premières fleurs épanouies sur la plante.

✓ **Nombre de fruits**

C'est le nombre de fruits observé sur tout le végétal. Ces mesures ont été effectuées chaque semaine pour dénombrer les fruits sur chaque plant de tomate.

✓ **Rendement**

Les rendements de la production des plants de tomate (12 plants de tomate) ont été déterminées à partir de la masse des fruits par planche, au cours de la récolte. A chaque récolte, les fruits sont pesés à l'aide d'un peson numérique (Germany-Max :200 g ; d : 0,1 mg). Cette opération s'est faite de façon régulière chaque semaine. A la fin des récoltes, la masse moyenne de fruit de tomate par traitement a été déterminée et estimée par hectare.

✓ **Analyses physico-chimiques et sensorielles des fruits**

Pour assurer une bonne analyse (physico-chimique et sensorielle) et une homogénéité des échantillons, les fruits de tomate de chaque traitement ont été cueillis au même stade de maturité. Ces fruits ont été conservés à une température ambiante ne dépassant pas 35°C. Un tri des fruits a été réalisé pour écarter ceux qui présentent des irrégularités et/ou défauts. Ensuite, un échantillon de 45 fruits de tomate a été fait pour chaque traitement. Ces échantillons ont été par la suite acheminés au laboratoire où ils ont subi différentes analyses.

✓ **Teneur en eau**

La méthode utilisée est celle proposée par l'AOAC (1995) dont le principe repose sur la perte de masse de l'échantillon jusqu'à une masse constante à $105 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A cet effet, une quantité de 5 g des fruits de tomate a été pesée à l'aide d'une balance de précision (Germany : Denver instrument, TP-214 28211211) dans un creuset de masse connue (M_0). L'ensemble (creuset + échantillon) de masse (M_1) a été séché à $105 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dans une étuve isothermique (UE53 PROLABO, 39711054, France) pendant 24 heures. Après refroidissement au dessiccateur (OHAUS, MB-23 infrarouge, Bretagne), le creuset a été à nouveau pesé (M_2). L'opération a été répétée jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La teneur en eau a été déterminée à partir de la formule suivante :

$$\text{Teneur en eau (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{PE} \times 100 \quad (1)$$

M_1 : Masse du creuset + masse de l'échantillon (en g) ;

M_2 : Masse de l'ensemble après étuvage (en g) ;

PE : Masse de l'échantillon (en g).

✓ **Acidité titrable et pH**

L'acidité et le pH ont été déterminés selon la méthode décrite par Dufour *et al.* (1996). Une quantité de 20 g de tomate a été broyée et délayée dans 200 mL d'eau distillée formant une solution de suspension 10 % (m/v). Cette suspension est agitée à la température ambiante (28 ou 30°C) pendant 30 minutes et centrifugée à 6000 tr/min, pendant 15 minutes.

Le pH est directement mesuré sur le surnageant recueilli au moyen d'un pH-mètre (EUTECH instrumest, pH 700, Singapore).

L'acidité titrable a été déterminée, à partir d'un volume de 50 mL du surnageant précédemment obtenu, par titrage d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH 0,1N) en présence de phénolphthaléine (1% dans l'éthanol). La formule suivante a été utilisée pour l'expression des résultats.

$$\text{A. T.} \left(\frac{\text{még}}{100\text{g}} \right) = \frac{N_b \times V_b \times V_d \times 100}{V_e \times PE} \quad (2)$$

V_b : Volume de soude versé (mL) ;

N_b : Normalité de soude (0,1 N) ;

V_d : Volume du diluant ou eau distillée (mL) ;

V_e : Volume de l'essai (mL)

PE : Masse de l'échantillon (5 g)

A.T. : Acidité titrable

✓ **°Brix et indice de réfraction**

Le °Brix et l'indice de réfraction est le principal paramètre technologique dans les concentrés et jus de tomate. Le Brix est défini comme étant la concentration en hydrates de carbone (principalement le saccharose) d'une solution aqueuse ayant le même indice de réfraction que le produit analysé.

Pour l'analyse, quelques gouttes du jus de tomate ont été déposées sur le prisme fixe d'un réfractomètre à main de marque ATAGO N- α (N-1 α , Brix 0-32, JAPAN) pour la lecture de l'indice de réfraction contre une source lumineuse. La concentration de matière soluble mesurée à 20 °C par l'indice de réfraction au moyen du réfractomètre, est ensuite exprimée en pourcentage selon la méthode normalisée NA 5669.

✓ **Vitamine C**

La teneur en vitamine C des tomates issues des différents traitements a été déterminée par la méthode de titrage indirecte de l'iodométrie décrite par Adrian (1956). Cette méthode a consisté à mettre un volume connu de jus de tomate en présence d'une quantité connue de diiode en excès. La totalité de la vitamine C réagit avec une quantité équivalente de diiode. L'excès de diiode est dosé par une solution de thiosulfate de sodium $Na_2S_2O_3$. Ainsi, une quantité de 20 g de tomate issue des traitements a été broyée et dissoute dans un volume de 100 mL d'eau distillée. Le mélange a été ensuite filtré et le jus obtenu a été recueilli dans un bécher de 200 mL. Puis, un volume de 5 ml de jus de tomate filtré comprenant quelques gouttes d'empois d'amidon a été additionné à un volume de 5 ml d'une solution d'iode (12,02 g/L). La solution devient alors noire du fait l'excès d'iode. L'excès d'iode de la solution a été titré par une solution de thiosulfate de sodium (5.10^{-3} mol/L) jusqu'à disparition complète de la coloration noire.

✓ **Teneur en lycopène**

Le dosage du lycopène donne une indication sur un critère de qualité de la tomate qu'est la couleur. La détermination du taux de lycopène a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre à 502 nm (Grolier, 1999 ; Grolier *et al.*, 2000). A cet effet, une quantité de 10 grammes des fruits de tomate issus des différents traitements a été broyée dans un volume de 10 mL d'eau distillée. Après filtration du broyat sur du papier filtre, un volume de 1 mL du jus de tomate a été additionné à un volume de 7 mL d'un mélange hexane/acétone/méthanol (2 : 1 : 1) pour solubiliser les caroténoïdes. Le mélange obtenu a été protégé de la lumière avec du papier aluminium, agité pendant 15 minutes au vortex, puis centrifugé à 3000 tr/min pendant 5 min. La phase supérieure du mélange centrifugé représentant la fraction organique, a été recueillie et un volume de 1 mL d'hexane a été ajouté à la fraction. L'absorbance a été lue à 502 nm après une dilution au 1/10. La quantité de lycopène est donnée par la formule suivante (Grolier *et al.*, 2000).

$$\text{Teneur en lycopène } (\mu\text{g}) = (\text{Abs} - 0,0222) / 0,3016 \quad (3)$$

✓ **Evaluation sensorielle : Test hédonique**

Pour la qualité des fruits de tomate fraîche, un ensemble d'attribut décrivant la couleur, la fermeté, le parfum et la saveur a été déterminé par analyse sensorielle. L'analyse sensorielle est un moyen efficace pour décrire les propriétés internes et d'analyser les préférences des consommateurs (Published, 2010).

Les études sensorielles des fruits de tomate issus des plants traités avec des biofertilisants ont porté sur l'état physique des échantillons en utilisant les paramètres de la norme NF ISO 5492 (1992) que sont la couleur, l'acidité, le goût (salé ou autre), la texture (consistance), l'odeur. Ainsi, à titre expérimental l'appréciation des caractéristiques sensorielles a été effectuée par un panel de consommateurs. Ceux-ci sont des consommateurs réguliers de la tomate et ont été recrutés au sein de la population estudiantine. Ce panel était constitué de personnes (60 personnes) dont l'âge se situait entre 20 et 35 ans. La session d'évaluation a eu lieu en salle sur des tranches de tomate soigneusement codées et servies dans des assiettes à usage unique. Les juges ont été convoqués par groupe de six personnes. Après les instructions d'usage et de procédures, ils ont été installés pour une évaluation des tomates sur les caractéristiques de couleur, d'odeur, de texture (fermeté) et de goût (acide et salé). Les réponses des juges ont été

recueillies sur une échelle de catégories à cinq points, à l'aide d'une fiche (Annexe 10). Les résultats ont été présentés en fonction des pourcentages des jugements.

3.3. Analyses statistiques des données

Les données collectées ont été saisies et traitées à l'aide du logiciel Microsoft Excel 2013. Les données des paramètres de croissance, de production et des caractérisations physicochimiques des échantillons ont été soumises à des analyses statistiques. Ainsi, une analyse de variance multidimensionnelle a été réalisée aux fins d'apprécier une différence significative entre les différents paramètres de productivité des plants de tomate en fonction des biofertilisants apportés et aussi pour chaque échantillon analysé. Des tests de comparaison multiples (Newman-Keuls) ont été conduits lorsque la différence a été révélée comme significative ($p < 0,05$) aux fins de séparer les différents échantillons. Le p-value de MANOVA ($P < 0,05$) a été considéré comme seuil de significativité. Pour $P < 0,05$, le produit de référence est considéré comme efficace sur le paramètre considéré. Pour ces traitements statistiques et représentations graphiques, les logiciels STATISTICA v 7.1 et PAST (ver 2.17c) et Microsoft Excel 2013 ont été utilisés.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical line on the left and a horizontal line at the top and bottom. The corners are rounded and feature small circular motifs.

TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 1 : RESULTATS

1.1. Effet des déchets de ferme sur la production *in vivo* de *Azolla sp*

1.1.1. Composition chimique de la bouse de vache et de la fiente de poulet

Les valeurs de la teneur en éléments nutritifs de la bouse de vache et de la fiente de poulet utilisées sont consignées dans le tableau I. La bouse de vache contient des éléments primaires de l'engrais, qui jouent un rôle majeur dans le développement des cultures agricoles. Ce sont l'azote sous ses différentes formes (NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+) puis le Phosphore et le Potassium. Elle contient aussi des nutriments secondaires tels que le calcium, le Magnésium, le Sodium, le Sulfate et des oligo-éléments comprenant des éléments à savoir le Cuivre, le Fer et le Manganèse.

Quant à la fiente de poulet, elle est riche en éléments primaires tel que : l'azote sous forme de nitrate, nitrite et d'ammonium puis le Phosphore et le Potassium. Les résultats du filtrat de fiente montrent également que la teneur en minéraux primaires des engrais présents dans ce filtrat sont assez importants. De plus, les nutriments secondaires tels que le Calcium (Ca), le Magnésium (Mg), le Sodium (Na), le Sulfate (SO_4^{2-}) et des oligo-éléments comme le Cuivre (Cu), le Fer (Fe) et le Manganèse (Mn) sont aussi observés.

Il ressort de l'analyse que le filtrat de fiente de poulet présente les meilleures concentrations en minéraux primaires des engrais (NO_3^- : $34 \pm 3,00$ mg/L, NO_2^- : $1,08 \pm 0,02$ mg/L, NH_4^+ : $5,99 \pm 1,09$ mg/L et PO_4^{3-} : $265,00 \pm 2,00$ mg/L) que celle de la bouse de vache (NO_3^- : $15 \pm 1,00$ mg/L, NO_2^- : $0,27 \pm 0,02$ mg/L, NH_4^+ : $5,41 \pm 0,14$ mg/L et PO_4^{3-} : $65 \pm 2,00$ mg/L). Cependant, la concentration du potassium contenu dans le filtrat de bouse de vache (K : $1667,59 \pm 13,41$ mg/L) est plus élevée que celle dans le filtrat de la fiente de poulet (K : $1227,22 \pm 4,78$ mg/L).

1.1.2. Production de *Azolla sp* par l'utilisation de déchet de ferme

Les valeurs du tableau II indiquent que le filtrat de bouse de vache et de fiente de poulet augmentent de façon significatif la masse des deux espèces de *Azolla* (*A. filiculoïdes* et *A. caroliniana*).

Le filtrat de bouse de vache a permis un accroissement de la masse de *A. filiculoïdes* de 100 g à 4300,23 g en 29 jours et de *A. caroliniana* à 4639,34 g en 23 jours.

L'analyse des résultats révèle également après 29 jours de culture que, les filtrats à base de fiente de poulet ont produit une quantité important de *A. caroliniana* ($7408,03 \pm 52,04$ g)

Résultats

Tableau I : Composition en minéraux du filtrat de bouse de vache et de fiente de poulet

	Eléments nutritifs	Filtrat de bouse de vache (mg /L)	Filtrat de fiente de poulet (mg /L)	P
Eléments primaires	Nitrate (NO ₃ ⁻)	15 ± 1,00 ^a	34 ± 3,00 ^b	0,001
	Nitrite (NO ₂ ⁻)	0,27 ± 0,02 ^a	1,08 ± 0,02 ^b	0,000
	Ammonium (NH ₄ ⁺)	5,41 ± 0,14 ^a	5,99 ± 1,09 ^a	0,410
	Phosphate (PO ₄ ³⁻)	65,0 ± 2,00 ^a	265,0 ± 2,00 ^b	0,000
	Potassium (K ⁺)	1667,59 ± 13,41 ^b	1227,22 ± 4,78 ^a	0,000
Eléments secondaires	Sulfate (SO ₄ ²⁻)	180,26 ± 0,74 ^a	720,1 ± 2,10 ^b	0,000
	Calcium (Ca ²⁺)	29,32 ± 0,88 ^a	47,57 ± 1,57 ^b	0,001
	Magnésium (Mg ²⁺)	12,14 ± 0,34 ^a	28,35 ± 1,35 ^b	0,001
	Sodium (Na ⁺)	129,1 ± 1,90 ^a	218,36 ± 2,64 ^b	0,001
Oligo-éléments	Fer (Fe ²⁺)	3,52 ± 0,48 ^a	11,69 ± 0,19 ^b	0,000
	Cuivre (Cu ²⁺)	0,08 ± 0,01 ^a	0,56 ± 0,02 ^b	0,000
	Manganèse (Mn ²⁺)	0,08 ± 0,01 ^a	1,18 ± 0,32 ^b	0,004

Les moyennes de la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

Résultats

Tableau II : Quantité de *Azolla* (*A. caroliniana* et *A. filiculoïdes*) produite avec le filtrat de bouse de vache et de fiente de poulet, en fonction du temps

Espèces traitées	Masse produite (g) par temps de culture (Jours)			
	1	15	23	29
<i>A.C Bv</i>	100 ± 0 ^a	1876,45 ± 25,85 ^{ab}	4639,34 ± 653,56 ^b	4167,74 ± 165,98 ^a
<i>A.C Fp</i>	100 ± 0 ^a	2022,65 ± 69,75 ^{bc}	6737,03 ± 466,56 ^c	7408,03 ± 52,04 ^c
<i>A.F Bv</i>	100 ± 0 ^a	1770,48 ± 150,85 ^a	3692,17 ± 326,19 ^a	4300,23 ± 153,09 ^a
<i>A.F Fp</i>	100 ± 0 ^a	2051,21 ± 74,96 ^c	6754,45 ± 366,03 ^c	5757,77 ± 356,46 ^b
P	1	0,018	0,000	0,000

Les moyennes de la même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (p < 0,05).

A.C Bv - *Azolla caroliniana* fertilisée avec le filtrat de la bouse de vache ; A.C Fp - *Azolla caroliniana* fertilisée avec le filtrat de la fiente de poulet ; A.F Bv - *Azolla filiculoïdes* fertilisée avec le filtrat de la bouse de vache ; A.F Fp - *Azolla filiculoïdes* fertilisée avec le filtrat de la fiente de poulet

significativement supérieure à celle de *Azolla filiculoïdes* qui a enregistré une valeur de $5757,77 \pm 356,46$ g durant le même temps.

Dans l'ensemble, le filtrat de fiente de poulet a le plus stimulé la croissance en masse des fougères *Azolla sp* que celui de la bouse de vache. Aussi, la meilleure croissance a été obtenue avec *Azolla caroliniana* cultivée avec le filtrat de fiente de poulet (7408,03 g).

1.2. Effet des fertilisants biologiques sur la production de la tomate

1.2.1. Composition chimique de la fougère *Azolla caroliniana*, du compost et du sol

Le tableau III présente les propriétés chimiques du filtrat à base de *A. caroliniana*, du compost et de la couche arable de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG). Ce tableau montre que, le calcium et le pH sont plus élevés dans le compost par rapport au sol de UJLoG et du fertilisant à base de *Azolla sp*. Cependant, les fertilisants biologiques (*A. caroliniana*, compost) et le sol contiennent les trois éléments primaires de la fertilisation (N, P et K). Mais, la concentration en azote dans *Azolla sp* (41,2 % par matière sèche), est très élevée par rapport à celle contenue dans le compost (1,3 % par matière sèche) et le sol de UJLoG (0,12 %). Le tableau révèle également que, la composition en Phosphore des trois substrats est inférieure à 1 % de matière sèche, mais celle du sol de UJLoG est plus élevée. Concernant le pH des trois substrats, il varie de 6,2 à 8,1. Les trois classes sont identifiées : la classe des pH peu acide avec le sol de UJLoG (pH = 6,1) ; la classe des pH sensiblement neutre avec *Azolla* (pH : 7,3) et enfin la classe des pH alcalin avec le compost (pH : 8,2).

1.2.2. Effets des biofertilisants sur les paramètres de croissance des plants de tomate en pépinière

1.2.2.1. Hauteur des plants

La croissance en hauteur des plants en fonction des différents traitements est présentée dans le tableau IV. Les fertilisants biologiques apportés ont permis d'augmenter de façon significative, la hauteur des plants de tomate par rapport aux témoins. La croissance en hauteur la plus élevée est observée au niveau des plants de tomate traités avec *A. caroliniana* ($13,77 \pm 0,38$ cm) puis des plants ayant reçu le compost ($12,42 \pm 0,51$ cm) et suivent ceux des témoins (NPK : $11,32 \pm 0,54$ cm et le sol sans amendement : $9,50 \pm 0,49$ cm).

Résultats

Tableau III : Composition et propriété chimique des différents substrats

Composition et propriété chimique						
Substrat	N (%)	P (%)	K (%)	Ca²⁺ (%)	Mg²⁺ (%)	pH
<i>Azolla</i>	41,2 ± 0,20 ^c	0,35 ± 0,03 ^a	2,71 ± 0,04 ^c	1,64 ± 0,04 ^a	0,25 ± 0,02 ^a	7,3 ± 0,10 ^b
Compost	1,3 ± 0,1 ^b	0,4 ± 0,05 ^a	1,2 ± 0,10 ^b	2,1 ± 0,10 ^c	0,5 ± 0,10 ^b	8,1 ± 0,10 ^c
Sol UJLoG	0,12 ± 0,01 ^a	0,88 ± 0,03 ^b	0,11 ± 0,01 ^a	1,86 ± 0,03 ^b	0,49 ± 0,01 ^b	6,1 ± 0,10 ^a
P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000

Les moyennes de la même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (p < 0,05).

Tableau IV : Variation du diamètre au collet et la hauteur des plants de tomate en pépinière en fonction des fertilisants

Paramètres	Fertilisants				
	Témoin	Compost	<i>Azolla</i>	NPK	P
Diamètre du Collet (cm)	0,23 ± 0,05 ^a	0,32 ± 0,04 ^b	0,40 ± 0,00 ^c	0,30 ± 0,00 ^b	0,000
Hauteur de la tige (cm)	9,50 ± 0,49 ^a	12,42 ± 0,51 ^c	13,77 ± 0,38 ^d	11,32 ± 0,54 ^b	0,000

Les moyennes de la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (p < 0,05).

1.2.2.2. Diamètre au collet

La fertilisation biologique à base de *Azolla caroliniana* ($0,40 \pm 0,00$ cm) a augmenté significativement ($P < 0,05$) la circonférence au collet des plants de tomate par rapport au compost et aux deux témoins (Tableau IV). De l'analyse statistique, il ressort que l'action du compost ($0,32 \pm 0,04$ cm) ne diffère pas de celle du NPK ($0,30 \pm 0,00$ cm) sur la croissance de la circonférence au collet des plants de tomate. De plus, la plus faible valeur en diamètre au collet est enregistrée avec le témoin sol sans amendement ($0,23 \pm 0,05$ cm).

1.2.3. Efficacité des doses de *Azolla sp* sur la production de la tomate en plein champ

1.2.3.1. Efficacité des doses de *Azolla sp* sur l'apparition des boutons floraux

L'action de la dose de *A. caroliniana* sur le nombre de plants de tomate ayant formé des boutons floraux est présentée par la figure 21.

Les différentes doses préparées ont stimulé l'apparition des bouquets floraux par rapport à la solution témoin (D_0) eau d'arrosage sans *Azolla sp*. Les boutons floraux sont apparus en premier sur les plants de tomate (8 plants) ayant reçu le filtrat de *A. caroliniana* dilué au un-demi. Cependant, la solution ($D1/5$) et la solution de culture de *Azolla sp* (eau du milieu de culture) n'ont pas enregistré de bouquet floral à la même date sur les plants de tomate. Au bout de deux semaines d'évaluation, le plus grand nombre de plant ayant des boutons floraux (27 plants) a été obtenu au niveau des plants de tomate ayant reçu le filtrat de *A. caroliniana* dilué de moitié ($D1/2$). La fougère *A. caroliniana* pure (21 plants) et *A. caroliniana* dilué au $1/10^{\text{ième}}$ (16 plants) ont permis suite au filtrat de *Azolla sp* dilué de moitié, d'obtenir un nombre important de bouquets floraux.

1.2.3.2. Efficacité des doses de *Azolla sp* sur l'apparition des fleurs épanouies

La figure 22 présente l'action des différentes doses de *A. caroliniana* sur le nombre de plants de tomate ayant des fleurs ouvertes. Il existe une différence en terme de nombre de fleurs épanouies suivant les différents traitements appliqués aux plants de tomate. Les différentes doses préparées ont dans leur ensemble, stimulé l'ouverture des fleurs par rapport à la solution de culture de *Azolla sp* (eau du milieu de culture) et à la solution témoin (D_0). Ces deux doses ont seulement permis respectivement à cinq et trois plants de tomate d'avoir des fleurs ouvertes, au bout de 18 jours d'évaluation. Cependant, au bout de ce même temps, les solutions de *Azolla*

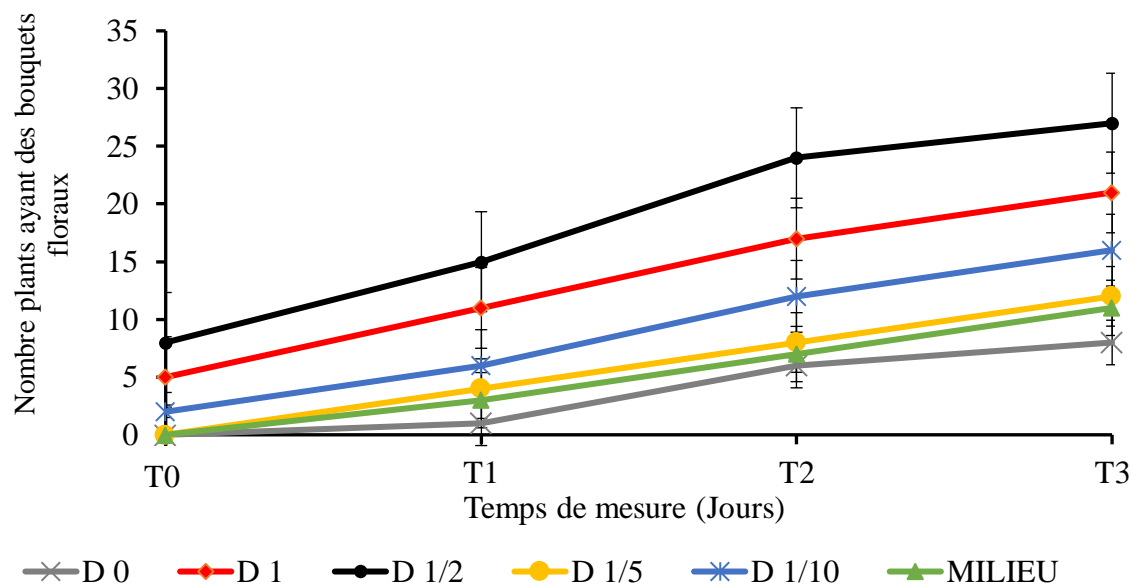


Figure 21 : Effets de la dose de *Azolla caroliniana* sur le temps d'apparition des boutons floraux des plants de la tomate

T0 : Temps des premières observations et mesures, T1 : Temps des deuxième observations et mesures, T2 : Temps des troisième observations et mesures et T3 : Temps des quatrième observations et mesures.

D0 = Témoin (eau de robinet), D1 = *Azolla* brute, D1/2 = filtrat dilué au 1/2, D1/5 = Filtrat dilué au 1/5^{ième}, D1/10 = Filtrat dilué au 1/10^{ième}, Milieux = solution du milieu de culture de *Azolla*.

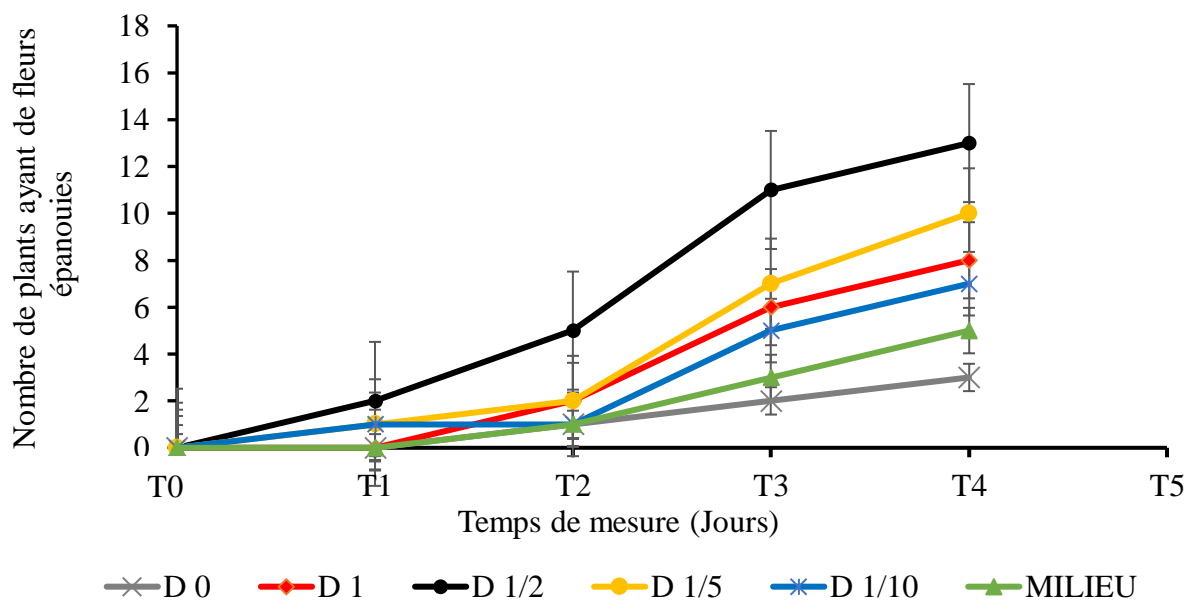


Figure 22 : Effets de la dose de *Azolla caroliniana* sur le temps d'apparition du nombre de fleurs épanouies des plants de la tomate

T0 : Temps des premières observations et mesures, T1 : Temps des deuxième observations et mesures, T2 : Temps des troisième observations et mesures, T3 : Temps des quatrième observations et mesures, T4 : Temps des cinquième observations et mesures et T5 : Temps des sixième observations et mesures.

D0 = Témoin (eau de robinet), D1 = *Azolla* brute, D1/2 = filtrat dilué au 1/2, D1/5 = Filtrat dilué au 1/5^{ième}, D1/10 = Filtrat dilué au 1/10^{ième}, Milieux = solution du milieu de culture de *Azolla*.

sp dilué de moitié, à 1/5^{ème} et 1/10^{ème} ont permis respectivement à 13, 10 et 8 plants d'avoir les fleurs ouvertes. En plus, les fleurs se sont épanouies premièrement sur les plants de tomate ayant été nourri respectivement avec le filtrat à base de *Azolla sp* dilué de moitié, au 1/5^{ème} et la fougère brute de *Azolla sp* (D1).

1.2.3.3. Efficacité des doses de *Azolla sp* sur l'apparition des fruits

L'action des différentes doses de *Azolla caroliniana* sur le nombre de plants de tomate ayant des fruits est résumée par la figure 23. Les différentes doses de *A. caroliniana* ont tous favorisé l'apparition des fruits des plants de tomate, mais, à des durées différentes. Les filtrats à base de *Azolla sp* dilués de moitié et 1/5^{ème} ont eu des actions plus rapide sur le temps d'apparition des fruits des plants de tomate par rapport à la solution témoin.

Après 24 jours d'évaluation, 17, 11 et 9 plants de tomate nourris respectivement au filtrat de *A. caroliniana* dilué de moitié, un-cinquième (D1/5) et la fougère brute de *Azolla* (D1) ont porté des fruits. Aussi, les premiers plants ayant portés des fruits sont ceux ayant reçu le filtrat de *A. caroliniana* dilué au un-demi comme nutriment. A la fin des mesures (T6), le plus grand nombre de plants ayant des fruits a été observé au niveau des plants de tomate ayant reçu le filtrat de *A. caroliniana* dilué de moitié (D1/2) suivie de (D1/5).

1.2.4. Effets des biofertilisants sur les paramètres agronomiques de la tomate en plein champ

1.2.4.1. Effets biofertilisants sur les paramètres végétatifs

✓ Hauteur des plants

Le tableau V montre la croissance en hauteur des plants de tomate selon les différents traitements. La croissance en hauteur des plants de tomate a varié entre 12,56 cm et 145,72 cm. La hauteur minimale (12,56 cm) a été enregistrée au niveau des plants nourris au compost à T0 et la maximale (145,72 cm), observée au niveau des plants ayant reçu *A. caroliniana* comme nutriment au temps T2. La taille moyenne des plants de tomate traités avec *Azolla sp* est significativement plus élevée que les plants ayant reçu le compost et les deux témoins (NPK et couche arable de sol sans amendement). Statistiquement, la croissance en hauteur des plants de tomates traités avec le compost et le NPK sont identiques.

Résultats

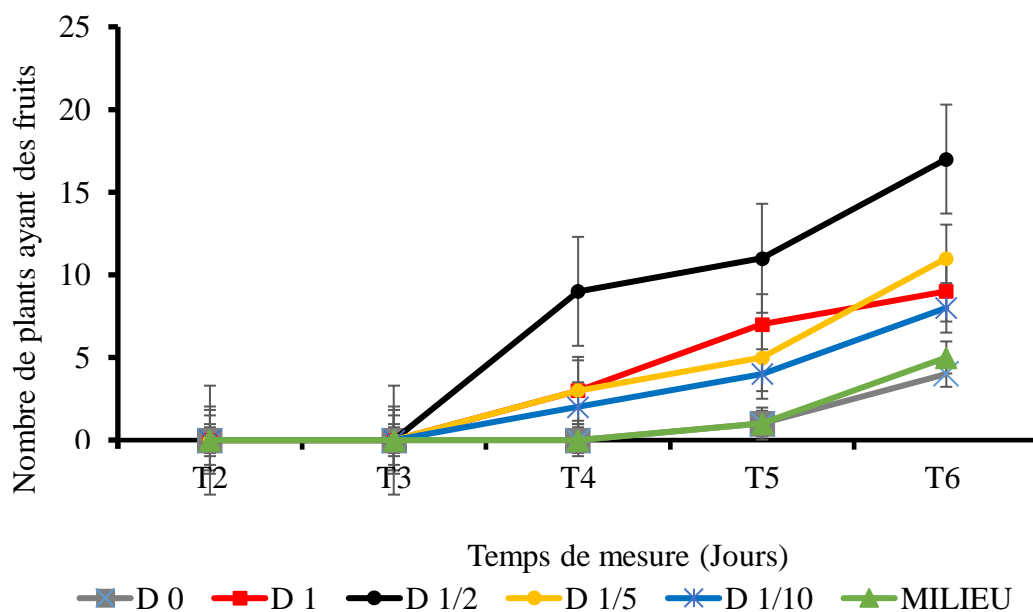


Figure 23 : Effets de la dose de *Azolla caroliniana* sur le temps d'apparition des fruits de tomate

T0 : Temps des premières observations et mesures, T1 : Temps des deuxième observations et mesures, T2 : Temps des troisième observations et mesures, T3 : Temps des quatrième observations et mesures, T4 : Temps des cinquième observations et mesures, T5 : Temps des sixième observations et mesures et T6 : Temps des septième observations et mesures.

D0 = Témoin (eau de robinet), D1 = *Azolla* brute, D1/2 = filtrat dilué au 1/2, D1/5 = Filtrat dilué au 1/5^{ième}, D1/10 = Filtrat dilué au 1/10^{ième}, Milieus = solution du milieu de culture de *Azolla*.

Tableau V : Variation de la hauteur des plants de tomate en fonction des fertilisants

Temps de mesure	Hauteur (cm)				
	Fertilisants				
	Compost	<i>Azolla</i>	NPK	Témoin	P
T0	12,56 ± 3,33 ^a	17,00 ± 4,29 ^b	13,55 ± 2,44 ^a	13,35 ± 2,12 ^a	0,017
T1	56,73 ± 7,92 ^b	67,40 ± 6,26 ^c	60,62 ± 5,01 ^b	39,00 ± 9,61 ^a	0,000
T2	128,55 ± 12,47 ^b	145,72 ± 17,05 ^c	130,30 ± 18,32 ^b	111,15 ± 11,30 ^a	0,0002

Les moyennes de la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

T0 : Temps des premières observations et mesures, T1 : Temps des deuxième observations et mesures et T2 : Temps des troisième observations et mesures

✓ **Longueur de la feuille**

L'action des différents amendements sur la longueur de feuilles des plants de tomate est présentée dans le tableau VI. Le traitement des plants de tomate avec les biofertilisants (compost et *Azolla caroliniana*) et le NPK, ont permis d'avoir une croissance statistiquement identique des longueurs de feuille au temps T1. Pour ce même temps, les planches témoins sans amendement ont enregistré les faibles allongements des feuilles de tomate. Cependant, au temps de mesure (T2) la longueur des feuilles est statistiquement identique pour tous les traitements (compost, *A. caroliniana*, NPK et témoin sans amendement). Dans l'ensemble, l'allongement moyenne des feuilles oscille entre $12,26 \pm 2,66$ cm avec le témoin au temps T0 et $42,77 \pm 5,70$ cm avec *A. caroliniana* au temps T1.

✓ **Nombre de ramifications**

Le tableau VII présente le nombre de ramifications des plants de tomate de la variété Boomerang F1, en fonction des fertilisants apportés au milieu de culture. Le nombre moyen de tiges secondaires varie de un (témoin sans amendement à T0) à 16 (NPK à T2). Chaque fertilisant apporté a élevé significativement ($p < 0,05$) le nombre de ramifications des plants de tomate à T0 et T1 par rapport au témoin sol sans amendement. Le nombre moyen de ramifications à T0 ou T1 sur les plants de tomate ayant reçu le compost et *A. caroliniana* est statistiquement identique à ceux ayant reçu le NPK. Cependant, au temps T2, le nombre de ramifications des plants de tomate est significativement identique pour tous les traitements apportés (compost, *A. caroliniana*, NPK et témoin sans amendement).

✓ **Diamètre au collet de la tige**

Le diamètre au collet des plants de tomate issus des différents traitements est consigné dans le tableau VIII. L'apport des fertilisants biologiques (compost et *A. caroliniana*), ont permis d'accroître de façon identique au NPK, le diamètre au collet des pieds de tomate par rapport au témoin sans amendement au temps T0 et T1. Cependant, au temps T2, la circonférence au collet des plants de tomate ne diffère statistiquement pas pour tous les traitements apportés (compost, *A. caroliniana*, NPK et témoin sans amendement).

1.2.4.2. Effets des biofertilisants sur les paramètres de rendement

✓ **Temps de floraison**

L'action des fertilisants sur le temps d'apparition des fleurs des plants de tomate est présentée à la figure 24. Cette figure montre que le biofertilisant *Azolla sp* a stimulé plus vite

Résultats

Tableau VI : Variation de la longueur des feuilles de tomate en fonction des fertilisants

Longueur (cm)					
Temps de mesure	Fertilisants				
	Compost	Azolla	NPK	Témoin	P
T0	14,94 ± 3,68 ^{ab}	19,39 ± 6,08 ^b	16,84 ± 3,29 ^{ab}	12,26 ± 2,66 ^a	0,004
T1	41,02 ± 8,79 ^b	42,77 ± 5,70 ^b	41,72 ± 4,19 ^b	31,86 ± 9,09 ^a	0,0062
T2	27,33 ± 7,96 ^a	26,73 ± 6,25 ^a	28,15 ± 6,61 ^a	24,95 ± 3,69 ^a	0,71

Les moyennes de la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

T0 : Temps des premières observations et mesures, T1 : Temps des deuxièmes observations et mesures et T2 : Temps des troisièmes observations et mesures

Tableau VII : Effet des fertilisants sur la ramification des tiges de tomate

Nombre de ramification					
Temps de mesure	Fertilisants				
	Compost	Azolla	NPK	Témoin	P
T0	0,90 ± 1,29 ^{ab}	0,90 ± 1,52 ^{ab}	2,10 ± 1,52 ^b	0,10 ± 0,32 ^a	0,0114
T1	7,90 ± 3,14 ^b	10,70 ± 2,50 ^b	9,70 ± 2,54 ^b	3,70 ± 3,13 ^a	0,000015
T2	12,50 ± 5,40 ^a	12,10 ± 3,63 ^a	15,50 ± 6,08 ^a	10,60 ± 6,10 ^a	0,25

Les moyennes de la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

T0 : Temps des premières observations et mesures, T1 : Temps des deuxièmes observations et mesures et T2 : Temps des troisièmes observations et mesures

Tableau VIII : Effet des fertilisants sur le diamètres au collet des tiges de tomate

Diamètre (cm)					
Fertilisants					
Temps de mesure	Compost	Azolla	NPK	Témoin	P
T0	0,68 ± 0,13 ^b	0,90 ± 0,16 ^b	0,77 ± 0,09 ^b	0,60 ± 0,08 ^a	0,00003
T1	1,26 ± 0,17 ^b	1,34 ± 0,22 ^b	1,27 ± 0,18 ^b	1,08 ± 0,18 ^a	0,029
T2	1,39 ± 0,30 ^a	1,50 ± 0,23 ^a	1,37 ± 0,39 ^a	1,22 ± 0,21 ^a	0,20

Les moyennes de la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

T0 : Temps des premières observations et mesures, T1 : Temps des deuxièmes observations et mesures et T2 : Temps des troisièmes observations et mesures

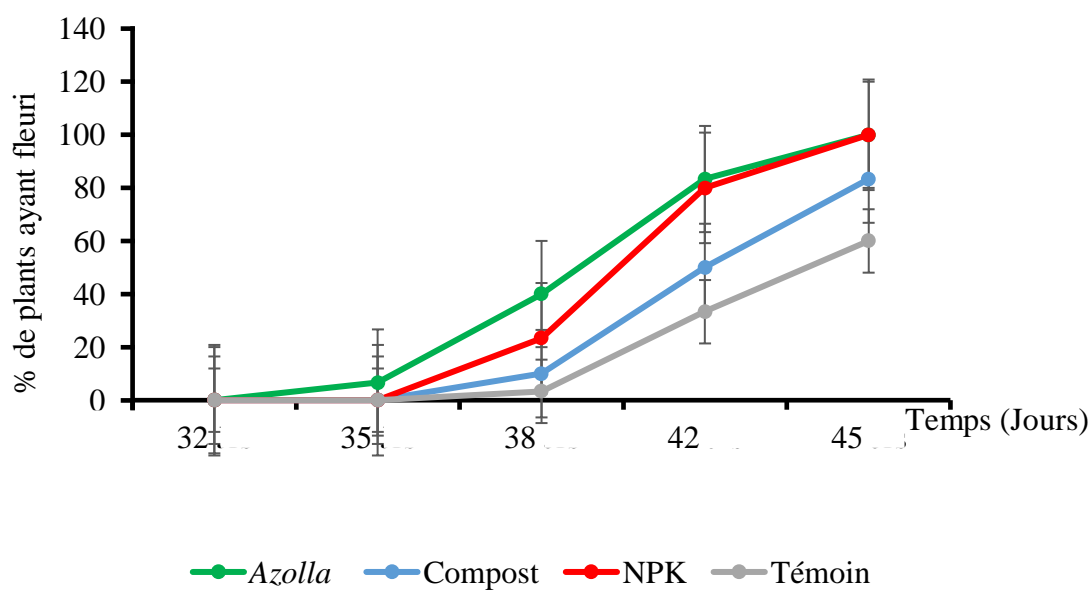


Figure 24 : Effet des différents fertilisants sur le temps d'apparition des fleurs

l'apparition des fleurs, contrairement aux autres fertilisants et au témoin (sol). Après 42 jours du cycle végétatif des plants de tomate, 50 % des plants ayant reçu les fertilisants comme nutriment ont fleuri. Les fleurs apparaissent en premier sur les plants de tomate ayant reçu *Azolla caroliniana* (après 35 jours du cycle végétatif). Cependant, *A. caroliniana* (80,33 %) et le NPK (80 %) ont donné les meilleurs taux de floraison pour ce même temps (42 jours) par rapport au compost et témoin.

✓ Nombre de bouquets floraux par plants

Les valeurs moyennes de bouquets de fleurs sur les plants de tomate nourris aux différents fertilisants sont consignées dans le tableau IX. Il ressort que les différents traitements apportés ont eu effet significatif sur le nombre de bouquets floraux produits par les plants de tomate ($P = 0,000$). Le fertilisant NPK a permis d'obtenir le nombre de bouquets floraux le plus élevé ($8,20 \pm 4,41$). Cependant, *A. caroliniana* ($6,93 \pm 5,36$) et le compost ($7,07 \pm 4,59$) ont eu un effet statistiquement identique mais significativement différent du témoin ($3,80 \pm 3,43$) sur le nombre de bouquets floraux produits par les plants de tomate.

✓ Nombre de fleurs par plants

Le nombre moyen de fleurs épanouies des plants est présenté dans le tableau IX. Le fertilisant NPK ($3,87 \pm 4,16$) et témoin ($1,93 \pm 2,74$) sans amendement ont eu effet significative ($P = 0,000$) sur le nombre de fleurs par rapport aux biofertilisants *A. caroliniana* et compost. Le nombre moyen minimal de fleurs est observé au niveau des plants ayant reçu *A. caroliniana*, tandis que la valeur maximale est enregistrée au niveau des plants traités avec le NPK.

✓ Nombre de fruits par plants

Le tableau IX présente le nombre moyen de fruits produits par les plants de tomate en fonction des différents traitements appliqués. Les résultats montrent que le fertilisant biologique (*A. caroliniana*) apporté, a permis d'avoir un nombre élevé de fruits par rapport au compost et les deux témoins (NPK et témoin sans amendement). Le nombre moyen de fruits varie de $14,93 \pm 7,93$ à $51,33 \pm 19,32$. La valeur maximale a été obtenue avec le fertilisant *A. caroliniana*, suivi du NPK puis du compost et du témoin sans amendement. *A. caroliniana* a permis aux plants de tomate d'obtenir une meilleure production de fruits ($51,33 \pm 19,32$ fruits par plant).

1.2.4.3. Effets des biofertilisants sur le rendement de la tomate

Le rendement de la tomate Boomerang est représenté à de la figure 25. Le fertilisant biologique

Tableau IX : Influence des fertilisants sur les paramètres de production de tomate

Paramètres de production			
Fertilisants	Nombre bouquets par plants	Nombre fleurs par plants	Nombre fruits par plants
Compost	7,07 ± 4,59 ^{ab}	1,60 ± 2,26 ^a	36,47 ± 14,61 ^{bc}
<i>Azolla</i>	6,93 ± 5,36 ^{ab}	1,40 ± 2,38 ^a	51,33 ± 19,32 ^c
NPK	8,20 ± 4,41 ^b	3,87 ± 4,16 ^b	41,73 ± 17,30 ^{bc}
Témoin	3,80 ± 3,43 ^a	1,93 ± 2,74 ^{ab}	14,93 ± 7,93 ^a
P	0,000	0,000	0,00000

Les moyennes de la même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

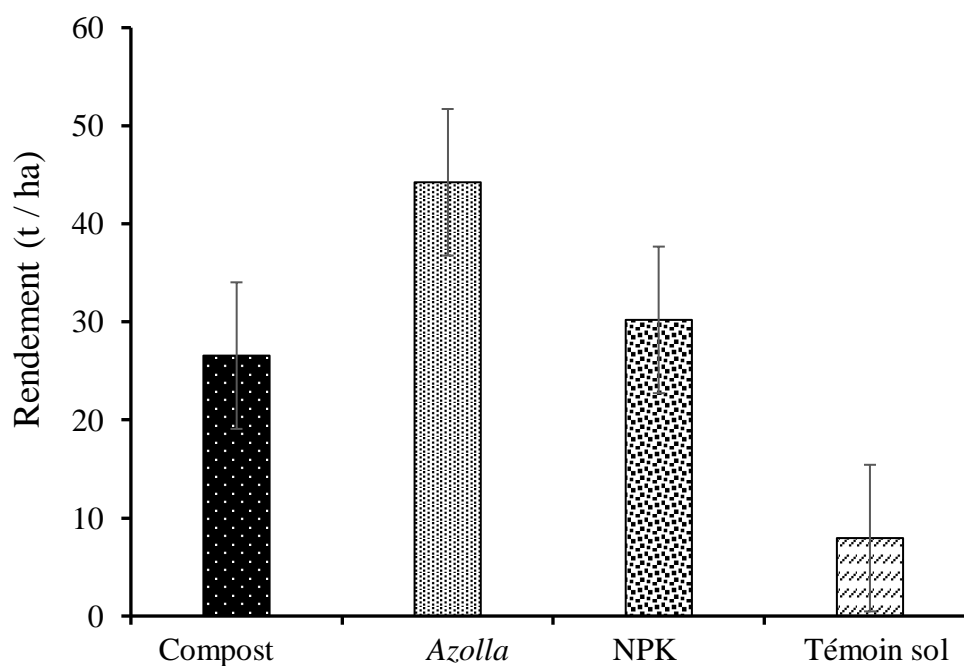


Figure 25 : Effet des traitements sur le rendement des fruits de tomate

A. caroliniana (44,23 t / ha) apporté aux plants, a eu un effet plus important sur le rendement que celui induit par le compost (26,56 t / ha) sur les plants. Cependant, le meilleur rendement s'observe sur les plants fertilisés avec *Azolla caroliniana* (44,23 t / ha) suivi de ceux ayant reçu le NPK (30,20 t / ha) puis ceux fertilisés avec le compost (26,56 t / ha) et des plants des témoins sol sans amendement (7,95 t / ha).

1.2.5. Effets de la variation saisonnière sur la productivité de la tomate traitée aux fertilisants biologiques

1.2.5.1. Effet de la variation saisonnière sur les paramètres de croissance

✓ Hauteur

Le tableau X présente l'action des différents traitements sur la hauteur moyenne des plants de tomate en fonction des saisons. La pluie a permis aux plants d'acquérir des hauteurs plus importantes en saison pluvieuse qu'en saison sèche. Selon l'analyse, il ressort une différence significative entre la hauteur des plants traités en saison pluvieuse et ceux traités en saison sèche ($p < 0,05$). Dans les deux saisons, la fougère *Azolla caroliniana* a favorisé la croissance en hauteur des plants de tomate par rapport au biofertilisant compost. Aussi, en saison pluvieuse, la croissance en hauteur la plus élevée est observée au niveau des plants de tomate traités à *A. caroliniana* suivie des plants ayant reçu le NPK et le compost puis le témoin sans amendement. En saison sèche, par rapport au compost, la croissance en hauteur la plus élevée est observée au niveau des plants de tomate nourris à *A. caroliniana*. Aussi, les plants traités avec *A. caroliniana* ($108,60 \pm 16,94$ cm), compost ($103,29 \pm 14,58$ cm) et NPK ($103,69 \pm 7,20$ cm), en saison sèche ne diffèrent pas significativement entre eux, mais le sont par rapport au témoin ($55,75 \pm 9,41$ cm).

✓ Longueur de la feuille

L'action des différents traitements sur la longueur moyenne des feuilles des plants de tomate, en fonction des saisons, est présentée au tableau X. Les différents traitements apportés, aussi bien en saison pluvieuse qu'en saison sèche, ont influencé la croissance des longueurs des feuilles. Les deux fertilisants biologiques (*Azolla sp* et compost) ont agi de manière similaire en saison pluvieuse mais, différemment en saison sèche sur la longueur des feuilles des plants de tomate. Selon les résultats, le NPK a permis d'obtenir les plus longues feuilles ($28,15 \pm 6,61$ cm) en saison pluvieuse. Cependant, en saison sèche, la longueur des feuilles la plus grande est obtenue avec le compost ($21,69 \pm 2,63$ cm). Dans l'ensemble, l'allongement moyenne des

feuilles oscille entre $19,67 \pm 2,12$ cm avec *Azolla caroliniana* en saison sèche et $28,15 \pm 6,61$ cm avec le NPK en saison pluvieuse.

✓ **Diamètre au collet de la tige**

Le diamètre au collet des plants de tomate issus des différents traitements en fonction des saisons est consigné dans le tableau X. Le biofertilisant *A. caroliniana* a eu un effet plus important sur la circonférence pieds de tomate par rapport au compost en saison des pluies. L'apport en saison pluvieuse de *A. caroliniana* et du compost, ont permis d'obtenir des diamètres de pied de tomate plus énormes que ceux obtenus avec le NPK et le témoin couche arable sans amendement. L'analyse statistique montre que, l'augmentation du diamètre au collet des plants en saison pluvieuse est importante chez ceux ayant reçus *A. caroliniana* ($1,50 \pm 0,23$ cm). En saison sèche, les plants traités à *A. caroliniana* et au compost ont eu des diamètres similaires. Dans l'ensemble, le diamètre au collet varie de $0,94 \pm 0,12$ cm avec témoin en saison sèche à $1,50 \pm 0,23$ cm avec *Azolla caroliniana* en saison pluvieuse. Le diamètre des plants est plus important en saison pluvieuse qu'en saison sèche.

✓ **Nombre de ramifications**

Le nombre de ramifications sur les plants de tomate issus des différentes fertilisations en fonction des saisons, a fluctué moyennement entre $3,70 \pm 3,13$ avec le témoin sans amendement en saison sèche à $15,50 \pm 6,08$ avec le NPK en saison pluvieuse (Tableau X). Chaque fertilisant apporté a augmenté significativement ($p < 0,05$) le nombre de ramifications des plants de tomate en saison des pluies et en saison sèche. L'analyse statistique montre que, le nombre de ramifications est plus importante avec le NPK en saison pluvieuse qu'avec les autres fertilisants (*A. caroliniana* et Compost) et le témoin sol sans amendement. En saison sèche, le même constat est fait ; le NPK permet d'obtenir un nombre plus élevé de ramifications que les autres fertilisants. Le nombre de ramifications par plants est plus important en saison pluvieuse qu'en saison sèche.

1.2.5.2. Effet de la variation saisonnière sur les paramètres de production

✓ **Nombre de fruits**

Le tableau XI présente l'effet des saisons sur le nombre moyen de fruits produits par les plants de tomate, en fonction des traitements. En fonction des saisons, la fougère *Azolla caroliniana* (saison pluvieuse : $51,33 \pm 19,32$ fruits, saison sèche : $37,07 \pm 20,88$ fruits) a permis d'avoir le plus grand nombre de fruits par plants de tomate par rapport au compost (saison

Résultats

Tableau X : Influence de la variation saisonnière sur les paramètres de croissance de la tomate en fonction des fertilisants

		Paramètres			
	Fertilisants	Hauteur de tige (cm)	Longueur de feuille (cm)	Diamètre au collet (cm)	Nombre de ramifications
Saison pluvieuse (avril à mi-juillet)	<i>Azolla</i>	145,72 ± 17,05 ^d	26,73 ± 6,25 ^{bcd}	1,50 ± 0,23 ^c	12,10 ± 3,63 ^{bc}
	Compost	128,55 ± 12,47 ^c	27,33 ± 7,96 ^{cd}	1,39 ± 0,30 ^{bc}	12,50 ± 5,40 ^{bc}
	NPK	130,30 ± 18,34 ^c	28,15 ± 6,61 ^d	1,37 ± 0,39 ^{bc}	15,50 ± 6,08 ^c
	Témoin	111,15 ± 11,30 ^b	24,95 ± 3,69 ^{abcd}	1,22 ± 0,21 ^{ab}	10,60 ± 6,10 ^{bc}
Saison sèche (décembre à mars)	<i>Azolla</i>	108,60 ± 16,94 ^b	19,67 ± 2,12 ^a	1,15 ± 0,07 ^{ab}	9,60 ± 2,32 ^b
	Compost	103,29 ± 14,58 ^b	21,69 ± 2,63 ^{abc}	1,12 ± 0,16 ^{ab}	8,00 ± 3,20 ^b
	NPK	103,69 ± 7,20 ^b	20,81 ± 2,38 ^{ab}	0,98 ± 0,13 ^a	10,10 ± 3,84 ^{bc}
	Témoin	55,75 ± 9,41 ^a	21,10 ± 3,79 ^{ab}	0,94 ± 0,12 ^a	3,70 ± 3,13 ^a
	P	0,000	0,0002	0,000	0,00001

Les moyennes de la même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

pluvieuse : $36,47 \pm 14,61$, saison sèche : $22,93 \pm 13,02$). En saison sèche, le nombre de fruits des plants varie de $13,53 \pm 6,99$ avec le témoin à $37,07 \pm 20,88$ avec *Azolla caroliniana*. Le nombre de fruits par plants est plus important en saison pluvieuse qu'en saison sèche.

✓ Masse des fruits

Les masses moyennes des fruits des plants de tomate issues des différentes fertilisations, en fonction des saisons, sont consignées dans le tableau XI. La masse des fruits a fluctué de $34,93 \pm 10,39$ g avec le témoin (couche arable) en saison sèche à $76,60 \pm 13,57$ g avec *A. caroliniana* en saison pluvieuse. La masse des fruits des plants de tomate nourris à *A. caroliniana* dans les deux saisons a été plus élevée que ceux traités au compost. L'analyse statistique montre également que, le fertilisant *A. caroliniana* a permis d'obtenir des masses plus élevées des fruits de tomate suivi du compost et du NPK puis du témoin sans amendement selon la saison. La masse moyenne de fruits par plants, est plus important en saison pluvieuse qu'en saison sèche.

1.3. Effet des biofertilisants sur la qualité nutritionnelle et organoleptique des fruits de tomate

1.3.1. Effet sur la composition physico-chimiques des fruits de tomate

L'analyse physico-chimique des fruits de tomate produites avec les différents fertilisants est consignée dans le tableau XII. La teneur en eau des fruits varie de 92,20 à 93,23 %. La plus faible teneur en eau a été observée au niveau des fruits de tomate dont les plants ont été nourris au compost (92,20 %). La teneur eau des fruits de tomate dont les plants ont reçu *A. caroliniana*, NPK et même sans traitement est statistiquement identique. Concernant le pH, l'analyse montre que les fruits de tomate issus des différents traitements possèdent des pH significativement différents ($P < 0,05$) avec des valeurs comprises entre 4,04 et 4,31. Ainsi, le pH des fruits dont les plants ont été amendés avec *A. caroliniana*, est supérieur à celui des fruits des plants de tomate traités au compost, au NPK et non traités (témoin). En ce qui concerne l'acidité, la plus forte acidité est observée au niveau des fruits des plants de tomate nourris fertilisés au compost de sciure de bois ($6,85 \pm 1,25$ g/l) alors que la plus faible est obtenue chez les fruits des plants traités avec *A. caroliniana* ($5,15 \pm 0,87$ g/l). Pour la quantité de matières solubles des fruits de tomate obtenus des différentes planches de culture, l'indice de réfraction enregistré varie de $6,63 \pm 0,48$ à $7,50 \pm 0,58$ %. Le plus fort indice de réfraction est observé avec les fruits des plants de tomate traités avec le NPK ($7,50 \pm 0,58$ %). L'analyse des résultats montre également

Tableau XI : Influence de la variation saisonnière sur les paramètres de production de la tomate en fonction des fertilisants

		Paramètres	
	Fertilisants	Nombre Fruits	Poids Fruits (g /fruit)
Saison pluvieuse (avril à mi-juillet)	<i>Azolla</i>	51,33 ± 19,32 ^d	76,60 ± 13,57 ^d
	Compost	36,47 ± 14,61 ^{bc}	64,73 ± 16,62 ^c
	NPK	41,73 ± 17,30 ^{cd}	64,33 ± 9,26 ^c
	Témoin	14,93 ± 7,93 ^a	47,33 ± 9,48 ^b
Saison sèche (décembre à mars)	<i>Azolla</i>	37,07 ± 20,88 ^{bc}	64,67 ± 13,55 ^c
	Compost	22,93 ± 13,02 ^{ab}	53,27 ± 15,78 ^{bc}
	NPK	28,20 ± 17,30 ^{abc}	51,67 ± 9,50 ^b
	Témoin	13,53 ± 6,99 ^a	34,93 ± 10,39 ^a
	P	0,000	0,000

Les moyennes de la même colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

Résultats

Tableau XII : Caractéristiques physico-chimiques des fruits de tomate en fonction des fertilisants

Paramètres	Fertilisants				
	<i>Azolla caroliniana</i>	Compost	NPK	Témoin	P
Teneur en eau	93,20 ± 0,45 ^b	92,40 ± 0,30 ^a	92,99 ± 0,65 ^b	93,23 ± 0,51 ^b	0,000
pH	4,31 ± 0,18 ^b	4,10 ± 0,06 ^a	4,17 ± 0,06 ^{ab}	4,04 ± 0,07 ^a	0,000
Acidité (g/l mf)	5,15 ± 0,87 ^a	6,85 ± 1,25 ^b	5,88 ± 0,39 ^b	6,13 ± 0,69 ^b	0,000
Indice de réfraction (°Brix)	6,80 ± 0,13 ^a	6,87 ± 0,30 ^a	7,50 ± 0,58 ^b	6,63 ± 0,48 ^a	0,000
Vitamine C (mg/100g mf)	44,44 ± 0,88 ^b	33,88 ± 1,52 ^a	43,56 ± 1,76 ^b	27,99 ± 5,17 ^a	0,000
Teneur en lycopène (mg/100g mf)	6,43 ± 1,30 ^b	5,57 ± 0,97 ^a	5,30 ± 0,20 ^a	5,03 ± 1,59 ^a	0,000

Les moyennes de la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

mf : matière fraîche

que le fertilisant *Azolla caroliniana* apporté aux plants, a eu la teneur la plus élevée en vitamine C ($44,44 \pm 0,88$ mg/100 g de matière fraîche) des fruits de tomate. Cependant, l'analyse statistique a montré aucune différence significative des teneurs en vitamine C des fruits des plants traités à *A. caroliniana* et au NPK. La teneur en vitamine C a oscillé entre $27,99 \pm 5,17$ et $44,44 \pm 0,88$ mg/100 g de matière fraîche (mf). Par ailleurs, *A. caroliniana* a aussi augmenté de façon significative ($P < 0,05$) la teneur en lycopène des fruits de tomate ($6,43 \pm 1,30$ mg/100 g de matière fraîche) par rapport aux autres fertilisants. Cependant, les teneurs en lycopène des fruits de tomate provenant des planches fertilisées au compost et au NPK sont statistiquement égales à celle des fruits de tomate non fertilisés.

1.3.2. Effets sur les paramètres organoleptiques des fruits de tomate

Le tableau XIII résume les effets des biofertilisants sur les paramètres organoleptiques des fruits des plants de tomate.

Il ressort de l'évaluation des paramètres sensoriels faite par les juges sur les fruits de tomate obtenus sur les planches fertilisées avec *A. caroliniana* que, 48 % des 60 personnes ont trouvé les fruits avaient une teinte rouge. Quant au goût, 39 % des juges ont indiqué que ces mêmes fruits étaient peu acides alors qu'ils sont jugés acides par 24 % des juges. En ce qui concerne l'arôme, 41 % des juges ont déclaré que les fruits obtenus à partir d'un amendement avec *A. caroliniana* avaient un arôme peu prononcé, contre 26 % qui les qualifiaient de prononcés. De plus, il ressort du même tableau que, 43 % des juges jugeaient les fruits de tomate produits avec *A. caroliniana* fermes, tandis que 41 % les trouvaient peu fermes.

Le tableau présente également les résultats des tests sensoriels des fruits de tomate obtenus après nutrition des plants au compost. L'analyse révèle que, 52 % des juges ont mentionné que les fruits de tomate étaient rouges, contre 35 % des juges qui les trouvaient très rouges. Par contre, 37 % des juges ont souligné que les fruits de tomate étaient peu salés. S'agissant de l'acidité des fruits de tomate obtenus suite à l'apport du compost sur les planches, 43 % des juges ont révélé qu'ils sont peu acides et seulement 13 % les jugeaient de très acides. Ce même tableau révèle que 52 % des juges ont souligné que les fruits produits avec le compost ont un arôme prononcé. Concernant la fermeté, 57 % et 31 %, des juges ont dénoté respectivement que les fruits de tomate obtenus avec le compost étaient fermes et peu fermes.

Les résultats des tests sensoriels des fruits de tomate obtenus après fertilisation des plants avec le NPK font ressortir que, 59 % des juges ont signifié que les fruits obtenus étaient rouges tandis que 14 % de ceux-ci les ont jugés très rouge. Ce tableau indique également que 46 %, et

Résultats

24 % des juges ont jugé respectivement que les fruits de tomate étaient peu acides et acides. Aussi, 44 % et 33 % des juges ont trouvé que ces tomates étaient respectivement peu salées et salées. Concernant la fermeté, 37 % des juges ont mentionné respectivement que les fruits des plants de tomate nourris au NPK étaient très fermes. Le parfum de ces mêmes fruits a été jugé peu prononcé par 44 % des juges (Tableau XIII).

En tenant compte des différentes appréciations des personnes interrogées, il ressort donc que, 52 % des juges ont trouvé que, les fruits de tomate provenant des planches fertilisées au compost étaient rouges par rapport à ceux obtenus sur les planches ayant été fertilisées avec *Azolla caroliniana* (48 % des juges). Cependant, ils ont jugé plus rouge, les fruits des plants de tomate ayant été nourris au NPK (59 % des juges) par rapport à ceux nourris au compost, *A. caroliniana* et témoin sans amendement. Quant au goût, 22 et 24 % des juges ont indiqué que les fruits des plants de tomate traités respectivement avec *A. caroliniana* et compost étaient acides. Le pourcentage de juges qui ont estimé que les fruits des plants de tomate traités avec *A. caroliniana*, NPK et témoin sans amendement étaient acides, est identique. En ce qui concerne le goût, 26 % des juges ont déclaré que les fruits obtenus à partir d'un amendement de *A. caroliniana* et de compost avaient un goût salé. Cependant, le NPK est jugé (37% des juges) comme le fertilisant apportant aux fruits un goût plus salé par rapport au compost, *A. caroliniana* et témoin sans amendement. Concernant la fermeté, 57 % des juges ont mentionné que, les fruits des plants de tomate traités au compost étaient fermes par rapport aux ceux nourris avec *A. caroliniana* (43 % des juges). Aussi, les fruits de tomate provenant des planches ayant reçu le compost, ont été jugés fermes par rapport aux fruits des plants traités au NPK et ceux non amendement. Dans ce même tableau, il ressort que, les fruits des plants de tomate ayant été nourris avec le compost sont jugés, comme ayant un parfum prononcé (52 % des juges) par rapport à ceux nourris au NPK, *A. caroliniana* et témoin sans amendement.

Résultats

Tableau XIII : Répartition des juges selon leurs appréciations des caractéristiques organoleptiques des fruits des plants de tomate

Fertilisants	Couleur		Acidité		Goût		Fermeté		Parfum	
	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)
<i>Azolla caroliniana</i>	Très rouge	38,89	Très acide	14,82	Très salé	5,56	Très ferme	11,11	Très prononcée	18,52
	Rouge	48,15	Acide	24,07	Salé	25,92	Ferme	42,59	Prononcée	22,22
	Peu rouge	12,96	Peu acide	38,89	Peu salé	40,74	Peu ferme	40,74	Peu prononcée	37,04
	Pas rouge	0	Pas acide	22,22	Pas salé	22,22	Pas ferme	5,56	Pas prononcée	20,37
	Indiffèrent	0	Indiffèrent	0	Fade	5,56	Indiffèrent	0	Indiffèrent	1,85
Compost	Très rouge	35,19	Très acide	12,96	Très salé	9,26	Très ferme	9,26	Très prononcée	3,7
	Rouge	51,85	Acide	22,22	Salé	25,92	Ferme	57,41	Prononcée	51,85
	Peu rouge	11,11	Peu acide	42,59	Peu salé	37,04	Peu ferme	31,48	Peu prononcée	27,78
	Pas rouge	1,85	Pas acide	20,37	Pas salé	16,67	Pas ferme	1,85	Pas prononcée	11,11
	Indiffèrent	0	Indiffèrent	1,86	Fade	11,11	Indiffèrent	0	Indiffèrent	5,56

Résultats

Tableau XIII (Suite et fin)

Fertilisants	Couleur		Acidité		Goût		Fermeté		Parfum	
	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)	Description	Juge (%)
NPK	Très rouge	14,81	Très acide	5,56	Très salé	5,56	Très Ferme	3,7	Très prononcée	5,56
	Rouge	59,26	Acide	24,07	Salé	33,33	Ferme	48,5	Prononcée	27,78
	Peu rouge	25,93	Peu acide	46,3	Peu salé	44,44	Peu Ferme	33,5	Peu prononcée	44,44
	Pas rouge	0	Pas acide	20,37	Pas Salé	12,96	Pas Ferme	0	Pas Prononcée	18,52
	Indifférent	0	Indiffèrent	3,7	Fade	3,7	Indifférent	14,3	Indiffèrent	3,7
Témoin	Très rouge	14,81	Très acide	1,85	Très salé	3,7	Très Ferme	18,52	Très prononcée	3,7
	Rouge	44,44	Acide	24,07	Salé	14,81	Ferme	46,3	Prononcée	29,63
	Peu rouge	37,04	Peu acide	35,19	Peu salé	38,89	Peu Ferme	27,78	Peu prononcée	48,15
	Pas rouge	3,71	Pas acide	33,33	Pas Salé	38,85	Pas Ferme	7,4	Pas Prononcée	12,96
	Indifférent	0	Indiffèrent	5,56	Fade	3,75	Indiffèrent	0	Indiffèrent	5,56

CHAPITRE 2. DISCUSSION

2.1. Effet des déchets de ferme sur la production *in vivo* de *Azolla sp*

L'analyse chimique des filtrats de bouse de vache et de fiente de poulet montre que ces deux filtrats contiennent des éléments primaires des engrais (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} et K) qui jouent un rôle majeur dans le développement des cultures. Par ailleurs, ils contiennent des nutriments secondaires tels que le calcium (Ca), le Magnésium (Mg), le Sodium (Na), le Sulfate (SO_4) et des Oligo-éléments : (Cuivre (Cu), le Fer (Fe) et le Manganèse (Mn)). Djogbede *et al.* (2012) ont montré que les plantes ont besoin de nutriments primaires (Azote, Phosphate et Potassium), secondaires (Calcium, Magnésium et Sulfate) et des oligo-éléments (Cuivre, Fer, Manganèse, Zinc, Bore, Molybdène et Chlore) pour mieux se développer. En effet, ces éléments sont essentiels pour le bon développement des végétaux (Groga *et al.*, 2018). Pour ces auteurs, les carences en macroéléments (P, K, Ca, Mg, Mn) et microéléments (Fe, Mo, Co) empêchent la bonne croissance de la plante. La bouse de vache et de fiente de poulet utilisées pour la fertilisation dans cette étude, contiennent ces différents éléments nutritifs, elles peuvent donc assurer la production de la fougère *Azolla sp*. De plus, la quantité totale d'azote (20,68 mg/L) présente dans le filtrat de la bouse de vache est relativement similaire à celle décrite par Pierre *et al.* (2014) qui était de 5,8 mg/L. Ces auteurs ont caractérisé la bouse de vache en vue de son utilisation comme fertilisant en culture. Ils ont montré que la bouse de vache pouvait stimuler la croissance de la plante. Aussi, il ressort de divers travaux que les déjections avicoles (fientes de poulets) améliorent les qualités physiques, chimiques et biologiques des substrats auxquels elles sont ajoutées (Chabalier *et al.*, 2007).

La production de *Azolla filiculoides* ou *Azolla caroliniana* s'est faite d'ajout de filtrat à base de bouse de vache ou de fiente de poulet dans la culture. Cette production est contraire à celle faite par Kathirvelan *et al.* (2015) et par Giridhar & Rajendran (2013). Pour ces auteurs, l'utilisation de bouse de vache uniquement ne suffit pas pour la mise en culture de *Azolla sp*. Pour eux, il faudrait ajouter à la bouse de vache, du sol et du superphosphate dans le milieu de culture. Pour Reddy *et al.* (2005), l'utilisation du superphosphate dans la culture de *Azolla sp*, constituerait un élément limitant pour sa production. Cependant, Thayyil & Pradeepkumar (2017) affirment que, la fougère *Azolla sp* pour sa croissance, a besoin des éléments nutritifs (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} et K) dans le milieu de culture. Par ailleurs, la présence d'éléments nutritifs tels que l'Azote et le Phosphore dans la bouse de vache et fiente de poulet permette à *Azolla sp* de se nourrir et croître (Sangaré *et al.*, 2009).

En ce qui concerne la quantité de *Azolla sp* produite, les résultats ont montré que le filtrat à base de fiente de poulet a le plus augmenté le rendement (masse) des deux espèces de *Azolla* par rapport au filtrat à base de bouse de vache. Ce rendement observé au niveau des *Azolla* (*A. caroliniana* *A. filiculoides*) ayant reçu la fiente de poulet comme amendement, s'expliquerait par le fait que sa concentration totale en phosphore et azote, est supérieure à celle du filtrat de bouse de vache. Selon les travaux de Naika *et al.* (2005), le fumier de volaille a une forte valeur agronomique. Il apporterait 60 à 90 % de l'azote sous forme minérale donc directement disponible pour la plante. De même, MRE (2002) rapporte que la teneur en Azote des déjections de poulet serait supérieure à celles de la vache d'où le bon rendement de *Azolla sp* obtenu avec le filtrat à base de fiente de poulet qu'avec le filtrat à base de bouse de vache.

2.2. Effet des substrats de *Azolla caroliniana* et du compost sur la productivité de la tomate

La détermination des effets des biofertilisants (*Azolla caroliniana* et compost) comparés au NPK et au témoin sol (couche arable) en pépinière et sur la productivité au champ a été réalisée.

Au niveau des pépinières, les biofertilisants apportés ont augmenté significativement les paramètres de croissance des plants par rapport au témoin sol.

Les résultats ont montré que, la hauteur et le diamètre au collet des plants en pépinière, ont varié significativement en fonction en fonction du fertilisant. En prenant en compte l'ensemble des fertilisants, les alvéoles présentant les meilleures croissances des plants par rapport aux témoins, sont celles qui contiennent le biofertilisant *A. caroliniana*. L'utilisation de *A. caroliniana* en milieu de culture a augmenté significativement la croissance en hauteur et la circonférence au collet des plants de tomate. Ces résultats confirment ceux de Grogga (2018) qui a rapporté que les fertilisants à base de *Azolla filiculoides* induisent une augmentation de la hauteur et du diamètre au collet des plants. Les bonnes caractéristiques observées chez les plants seraient dues au fait que cette fougère (*A. caroliniana*), a apporté au milieu de culture, une quantité importante d'azote utile pour la plante. Cette quantité importante d'azote serait le résultat de la vie symbiotique qu'elle réalise avec une cyanobactérie fixatrice d'azote atmosphérique (Blondeau, 1981). Selon Van Hove *et al.* (1983), *Azolla sp* abrite des cyanobactéries réalisant une symbiose héréditaire avec *Anabaena azollae*, cyanobactérie diazotrophe, capable d'utiliser le diazote (N₂), c'est-à-dire de transformer l'azote moléculaire de l'atmosphère en azote fixé assimilable par la plante. Aussi, William (2003), révèle qu'un

excès d'Azote stimule une croissance exubérante de la partie aérienne. Le taux d'Azote dans *Azolla caroliniana* est important, donc une recherche d'une dose optimale a été évaluée.

Les résultats de la recherche de dose optimale révèlent que le filtrat de *A. caroliniana* dilué de moitié (D1/2) a eu un effet significatif sur la précocité des plants de tomate. Car l'apparition des boutons floraux, l'ouverture des fleurs et la formation des fruits des plants de tomate se sont produites premièrement sur les plants ayant reçu le filtrat de *A. caroliniana* dilué de moitié. Ces résultats sont conformes à ceux de Inckel *et al.* (2005), qui précisent que la meilleure formulation de la dose à appliquer est de diluer le contenu de la barrique (filtrat) dans le rapport un sur deux (1/2). Ces mêmes résultats sont soutenus par la loi des excédents ou loi de Mitscherlich qui stipule : « lorsque des doses croissantes d'engrais sont apportées à une culture, à des augmentations égales des quantités d'engrais correspondent à des augmentations de rendements de plus en plus faibles, au fur et à mesure que les doses d'engrais s'élèvent » (Batamoussi *et al.*, 2016). La dose (D1/2) du filtrat à base de *A. caroliniana* contiendrait la concentration d'azote optimale pour la stimulation de la production des plants de tomate. Cependant, cette dose dépend du fertilisant utilisé (Liptay & Sikkema, 1998 ; Mario, 2010).

Quant à l'effet des biofertilisants sur la productivité de la tomate au champ, les résultats montrent une réaction positive de cette culture en présence de ces fertilisants organiques.

La hauteur moyenne des plants de tomate traités avec *A. caroliniana* est plus importante et significativement différente de celle induite par les autres formulations (compost, NPK et témoin sol). Ces résultats sont identiques à celui de Grogga *et al.* (2018) qui a montré que la taille moyenne des plants de tomate traités avec *Azolla sp* est plus élevée et significativement différente de celle induite par le NPK, le compost et le témoin. Ce résultat peut être dû au fait que, non seulement le filtrat à base de *Azolla sp*, a été mieux absorbé par les plantes, mais il a aussi renforcé l'efficacité des minéraux du sol. La fougère *Azolla sp* peut libérer progressivement des minéraux et cela pourrait assurer une disponibilité de l'azote à la plante au moment de ses besoins nutritifs (William, 2003 ; Ojetayo *et al.*, 2011). Les travaux de Kotaix *et al.* (2013), ont montré que l'azote, est le principal élément nutritif, responsable de la croissance quantitative du végétale. De même, les travaux de Zaoui & Brun (2011), témoignent par ailleurs que les fertilisations biologiques permettent d'augmenter de manière nette l'efficacité de la fertilisation sur des sols difficiles à travailler.

La croissance en longueur des feuilles, l'augmentation en diamètre au collet et le nombre moyen de ramifications sur les plants de tomate (Boomerang F1) ne diffèrent pas en fonction du traitement apporté. Les fertilisants biologiques (*A. caroliniana* et compost) et le NPK ont des effets statistiquement similaires, mais différentes du témoin sans amendement, sur ces

paramètres. Les résultats obtenus montrent qu'il suffit de fertiliser le sol pour observer une différence du plant de la tomate plus importante par rapport au témoin. Cependant, les analyses de sols ont indiqué la présence de matière organique, azote et phosphore. Selon Schafer (1999), chimiquement le sol paraît riche, mais les éléments fertilisants qu'il renferme sont peu disponibles pour la culture en place. Car, les sols ferrallitiques renferment les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium qui contractent des liaisons avec la matière organique et le phosphore, limitant ainsi la disponibilité de ces éléments pour les microorganismes et les plantes (Schafer, 1999).

S'agissant des paramètres de production, les biofertilisants (*Azolla caroliniana* et compost) apportés aux plants de tomate, ont plus favorisé son rendement par rapport aux témoins (NPK et témoin sans amendement). Le nombre moyen de fruits des plants de tomate traités avec *A. caroliniana* est plus élevé que ceux ayant reçu le compost puis les deux témoins. Aussi, ce même biofertilisant (*Azolla sp.*), utilisé a permis aux plants de tomate d'avoir des fruits ayant des masses et des rendements les plus élevés. Ces résultats sont conformes à ceux de Fondio *et al.* (2013) qui ont montré que l'application de biofertilisant à base de *Azolla sp* respectivement sur la tomate et le piment a permis d'obtenir un nombre plus important de fruits. Ce rendement élevé obtenu pourrait se justifier d'abord, par l'apport de l'azote sous forme organique au milieu de culture. Ce qui a fait dire à Thomas *et al.* (2004) et Kitabala *et al.* (2016) que la fertilisation en azote affecte tous les paramètres contribuant à l'obtention d'un bon rendement. Ensuite, *Azolla sp* et le compost fourniraient des éléments nutritifs primaires, secondaires et oligo-éléments aux plantes. Le fertilisant NPK ne présente que les 3 éléments primaires des engrais. Pour Giller *et al.* (2002) et Alvarez (2005), l'apport d'engrais minéraux seuls ne peut pas maintenir à long terme la productivité des sols à cause du lessivage et de la dégradation des propriétés des sols. Pour ces auteurs, la matière organique (fertilisant organique) est le meilleur fertilisant de base.

2.3. Effet des différentes fertilisations sur la productivité de la tomate en fonction des saisons

Les variations saisonnières sur les paramètres de croissance et de production ont été évaluées. Les résultats des différents traitements montrent que les fertilisants biologiques ont permis d'augmenter significativement les paramètres de croissance et de production des plants de tomate, quelle que soit la saison (pluvieuse ou sèche). Ce résultat pourrait se justifier par la facilité qu'a la plante d'utiliser les éléments nutritifs apportés par les biofertilisants par rapport

au NPK. Il ressort également que les meilleurs paramètres de croissance sont obtenus en saison pluvieuse. Ces résultats sont conformes à ceux de Soro *et al.* (2007) et Yehouessi (2012) et Kataria *et al.* (2014) qui ont travaillé sur la variation saisonnière de la croissance d'une graminée (*Brachiaria mutica*) et de la tomate. En effet, ces auteurs ont montré une faible productivité de ces plantes en saison sèche contrairement à celles obtenues en saisons des pluies.

2.4. Effet des différentes fertilisations sur la qualité nutritionnelle et organoleptique des fruits de tomate

Les différents échantillons de fruits des plants de tomate nourris avec *Azolla caroliniana* et le compost ont montré des différences significatives au niveau des paramètres physicochimiques et organoleptiques. La composition approximative en eau des fruits des plants de tomate traités avec *A. caroliniana* était supérieure à ceux traités au compost. Cependant, la teneur en eau des fruits traités avec *A. caroliniana*, était statistiquement identique aux fruits des plants de tomate ayant reçu le NPK et au témoin sans amendement. Les différentes teneurs en eau enregistrées, sont semblables à ceux de Pinela *et al.* (2012) qui ont travaillé sur la composition alimentaire et activité de l'antioxydant de quatre tomates au Portugal. Ils ont noté une variabilité de la teneur eau des fruits de tomate allant de 90,63 à 93,70 %. Ces teneurs en eau sont aussi proches de celles rapportées par d'autres auteurs (Sulbarán *et al.*, 2011 ; FAO, 2012). Ces auteurs ont trouvé des teneurs en eau comprises entre 93,50 % et 94,60 %. *A. caroliniana* et le compost influenceraient donc très peu la teneur en eau des fruits de tomate.

Le biofertilisant *A. caroliniana* a eu un effet significatif positif sur le pH des fruits de tomate par rapport au compost. Mais, le pH des fruits des plants de tomate amendés au compost est significativement identique aux fruits des plants ayant reçu le NPK et le témoin sans amendement. Dans l'ensemble, le pH des fruits des plants de tomate traités par ces biofertilisants est supérieur à celui des fruits des plants témoins sans amendement. Les fruits de tomate sont généralement considérés comme acide, mais leur pH peut varier significativement selon la variété (Dossou *et al.*, 2007). Par ailleurs, le pH moyen des fruits de tomate obtenu après fertilisation des plants avec ces biofertilisants est inférieur à 7. Par conséquent, ces fruits sont acides (Giordano *et al.*, 2000). Ces résultats corroborent ceux de Campos *et al.* (2006) et ceux de Oboulbiga *et al.* (2017). Selon ces auteurs, les fruits de tomate ont en général un pH compris entre 3,70 et 4,50. Ce pH relativement faible des fruits de tomate est un avantage du point de vue de la stabilité du fruit. En effet, ce niveau de pH pourrait réduire considérablement

la prolifération des microorganismes pouvant se développer sur les fruits de tomate (Agassounon *et al.*, 2012).

Azolla caroliniana a permis également de baisser l'acidité totale des fruits. Dans cette étude, l'acidité totale enregistrée se situait entre 5,15 et 6,85 g/L. Ces valeurs sont supérieures à celles rapportées par certains auteurs (Granges *et al.*, 2006, Abreu *et al.*, 2011 ; Agassounon *et al.*, 2012) qui ont montré que l'acidité des tomates variait de 4,5 g/L à 5,72 g/L. Cette différence pourrait s'expliquer par les conditions du site d'expérimentation (site de culture des plants de tomate) qui sont différents. L'acidité des fruits de tomate est aussi supérieure à celle rapportée par Turhan et Seniz (2009) et par Oboulbiga *et al.* (2017) qui variaient respectivement de 0,34 à 4 g/l et de 3,9 à 5,5g/l.

Pour ces fruits de tomates, il est observé que *A. caroliniana* et le compost n'ont pas agi de façon significative sur l'indice de réfraction des fruits. Cependant, les différents indices de réfraction des fruits de tomate obtenus étaient supérieurs à ceux observés par Sutharsan *et al.* (2014), Abidi *et al.* (2017) et Oboulbiga *et al.* (2017) qui se situaient entre 3,10 % et 5,93 %. Cette différence pourrait s'expliquer par la composition du fertilisant utilisé et aussi les conditions du milieu de culture. Cependant, Garcia et Barrett (2006) ont rapporté des taux de Brix (compris entre 4,5% et 6,25 %) pour la tomate destinée à la transformation, se rapprochant des valeurs obtenues dans cette expérimentation.

Les fruits de tomate sont reconnus pour leur richesse en vitamine C (vitamines hydrosolubles) avec des teneurs variables selon les variétés et les conditions de culture (Bachir *et al.*, 2014). Les fruits ont généralement des teneurs en vitamines C comprises entre 7 et 30 mg/100 g (de matière fraîche) et peuvent atteindre 70 mg/100 g (Chanforan, 2010). Les teneurs obtenues avec cet intrant biologique (*Azolla sp*), sont significativement supérieures à celles des fruits traités au compost témoin sans amendement. Aussi, convient-il de signaler que ces teneurs en acide ascorbique sont supérieures à celles obtenues par Toor *et al.* (2006) et Bachir *et al.* (2014). Leurs travaux réalisés sur différentes variétés de tomate ont révélé des quantités de vitamine C comprises entre 7 et 16,7 mg/100 g mf (de matière fraîche). Notons que la teneur en vitamine C des fruits de tomate dépend principalement des facteurs génétiques et environnementaux, et de l'étape de maturation (Hallmann, 2012 ; Nour *et al.*, 2013). Par ailleurs, la forte teneur en vitamine C obtenue suite à l'apport de *A. caroliniana* s'expliquerait par la richesse en substances bioactives, en antioxydants et en métabolites secondaires de cette fougère (Luthria *et al.*, 2006 ; Li *et al.*, 2011). En effet, les substances telles que les caroténoïdes et les composés phénoliques affectent positivement le métabolisme cellulaire des plantes cultivées en favorisant la synthèse de la vitamine C (Luthria *et al.*, 2006). En outre, grâce aux

Discussion

micronutriments et aux matières organiques que contiennent les fougères *Azolla sp*, elles pourraient améliorer la fertilité du sol et facilitent l'absorption des éléments nutritifs dont la plante a besoin pour synthétiser cette vitamine (Liu & Lijun, 2011 ; Zodape *et al.*, 2011). Selon Khan & Martell (1967) les produits chimiques (NPK) et la température dénature la vitamine C. De plus, dans la culture de tomate, certaines études tendent à démontrer que la qualité nutritive des tomates augmente dans une régie de culture biologique, la vitamine C comparativement à une culture traditionnelle (Oliveira *et al.*, 2013 ; Dorais & Alsanius, 2015).

Les fruits de tomate et les produits à base de tomates sont les principales sources de lycopène, de caroténoïdes qui donne sa couleur rougeâtre. La teneur en lycopène des fruits de tomate frais est extrêmement variable, selon des critères agronomiques. Ainsi, elle pourrait varier de 1,9 à 6,8 mg/100 g selon les variétés et en fonction des calendriers de récolte (Benakmoum, 2009). Dans cette étude, les teneurs en lycopène (5,03 à 6,43 mg/100 g mf) des fruits de tomate dont les plants ont été traités avec les biofertilisants sont comprises entre celles obtenues par Martínez-Valverde *et al.* (2002), Kuti & Konuru (2005) et aussi Benakmoum (2009). Ces auteurs ont obtenu des concentrations en lycopène comprises entre 1,8 et 6,8 mg/100 g mf pour des variétés espagnoles. Cette variation de la teneur en lycopène de la tomate serait liée à sa variété. Les résultats de cette étude montrent également que, le biofertilisant *Azolla caroliniana*, a influencé significativement la teneur en lycopène des fruits de tomates par rapport au compost, NPK et témoin sans amendement. Ceci confirme les travaux de Craige (2011) et ceux de Guinan *et al.* (2012) qui ont affirmé que les algues améliorent les propriétés du sol et influencent les caractéristiques biochimiques (pH, brix, lycopène et vitamine C) des fruits de tomate.

Concernant les caractéristiques organoleptiques des fruits des plants de tomate produits avec l'apport des biofertilisants, les appréciations des évaluateurs sont très variables suivant les critères retenus (couleur, acidité, goût, fermeté et parfum). Selon Bavay (2013), les différences individuelles impliquées dans la réponse des juges dépendaient de leur appréciation. Cependant, la qualité des fruits de tomate est basée sur des critères organoleptiques comme Dossou *et al.* (2007) l'ont fait remarquer à travers leur étude portant sur la production de concentré de tomate réalisée au Bénin. Dans cette étude, un nombre élevé de personne trouvait que les fruits de tomate produites avec le NPK étaient rouges et salés par rapport à ceux ayant reçu les biofertilisants et aussi le témoin sans amendement. Cependant, les fruits jugés fermes avec un parfum prononcé provenaient des plants de tomate traités au biofertilisant compost. La saveur, la couleur, la forme et la texture sont autant de critères importants des tomates fraîches (Bavay, 2013). Les biofertilisants utilisés dans cette étude ont permis d'avoir des tomates appréciables.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical bar on the left side and a small circular flourish at the top right corner.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

La présente étude a consisté premièrement à expérimenter l'action du filtrat à base de bouse de vache et de fiente de poulet sur la production *in vivo* de *Azolla filiculaoides* et de *Azolla caroliniana*. Ensuite une comparaison de l'effet du filtrat à base de *Azolla caroliniana* puis du compost (fiente de poulet, sciure de bois blanc de *Triplochiton scleroxylon*, parche de café, et du charbon de bois) en comparaison avec le NPK sur la productivité de la tomate (*Solanum lycopersicum*) en pépinière puis au champ a été réalisée. Enfin, pour une bonne appréciation des fruits issus des plants de tomate traités, une étude organoleptique et une analyse physico-chimique ont été effectuées au laboratoire de biochimie de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa. Au terme de cette étude, il ressort que la production *in vivo* de *Azolla sp* peut se faire par l'utilisation des déchets de ferme (filtrat à base de bouse de vache ou de fiente de poulet) en 23 jours. Toutefois, cette production est importante en milieu additionné au filtrat à base de fiente de poulet par rapport à celle obtenue avec le filtrat à base de bouse de vache. Par ailleurs les travaux ont montré que tous les biofertilisants utilisés ont augmenté significativement la hauteur de tige, le diamètre au collet, la masse et le nombre de fruits par rapport aux témoins (NPK et témoin sans amendement). Parmi eux, le biofertilisant *A. caroliniana* s'est révélé significativement plus efficace aussi bien pour la croissance d'organes végétatifs, que pour la productivité des plants de tomate par rapport au compost utilisé. Aussi, *Azolla sp* par sa richesse en nutriments azotés, a démontré ainsi sa capacité à augmenter le rendement des plants de la tomate de la variété Boomerang F1. Enfin, l'étude de la qualité organoleptique et physico-chimique des fruits de tomate a révélé des différences entre les fruits issus des plants traités par les biofertilisants et ceux des plants issus du NPK et du témoin. Les biofertilisants utilisés ont permis d'avoir des fruits de tomate appréciables. Ainsi, le compost a induit une réduction de la teneur en eau des fruits de tomate tout en augmentant leur fermeté et leur parfum.

Comparativement à l'action de l'engrais NPK, la fougère *A. caroliniana* utilisée comme biofertilisant, a donné de meilleurs résultats. Elle a amélioré les paramètres de qualité des fruits de tomate (pH, acidité, teneur en vitamine C et la teneur en lycopène). En conditions expérimentales, l'utilisation de *A. caroliniana* et du compost comme amendements organiques a constitué une source d'éléments nutritifs (primaires, secondaires et oligo-éléments) nécessaire pour la plante de tomate. Ces fertilisants biologiques pourraient être une alternative à l'amélioration des cultures. Ils pourraient donc être utilisés pour améliorer les caractéristiques de croissance, de production, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques des produits récoltés.

PERSPECTIVES

Cette étude qui renforce les connaissances sur la production et donc l'utilisation agronomique de *Azolla sp* mérite d'être poursuivie, notamment en Côte d'Ivoire.

Afin d'apporter un plus à la culture maraîchère par l'utilisation de biofertilisants, il serait important de :

- effectuer des tests complémentaires d'efficacité fertilisante de *Azolla sp* dans d'autres villes du pays et à différentes saisons en vue de mieux apprécier son pouvoir fertilisant ;
- effectuer des tests sur d'autres cultures pour confirmer les résultats de cette étude ;
- étendre l'analyse physico-chimique des fruits de tomate à d'autres paramètres nutritionnels tels que les sucres totaux, les sucres réducteurs, les protéines, les lipides, les acides organiques, les minéraux, etc.

Pour atteindre la sécurité alimentaire et la protection de l'environnement, l'utilisation des biofertilisants peuvent constituer un moyen pratique. Ainsi, suite à la bonne action de *Azolla sp* sur la productivité de la tomate, nous recommandons ce qui suit :

- au monde agricole, l'utilisation du biofertilisant *Azolla sp* pour la culture de la tomate ;
- au monde scientifique et aux gouvernants, la valorisation de la culture de *Azolla sp* sur les eaux stagnantes des bas-fonds libres.



REFERENCES

REFERENCES

- Abawi G.S. & Widmer T.L. (2000). Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes, and root diseases of vegetable crops. *Applied Soil Ecology*, 15 : 37 - 47.
- Abidi L., Snoussi S.A. & Bradea M.S. (2017). Variation du taux de brix sous l'effet d'un biofertilisant. *Scientific Bulletin-University politehnica of Buchares, Series B*, 79: 136 - 144.
- Abreu W.C., Barcelos M.F.P., Silva E.P. & Boas E.V.B.V. (2011). Physical and chemical characteristics and lycopene retention of dried tomatoes subjected to different pretreatments. *Revista do Instituto Adolfo Lutz, São Paulo*, 70(2) : 168 - 74.
- Accodji J.M.M., Fiogbé E.D. & Gangbazo K. H. (2009). Essai de valorisation d'*Azolla* (*Azolla microphylla* Kaulf) dans la production porcine en zone humide. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3(5) : 890 - 898.
- Adou D.L. (2012). L'économie de plantation et la dynamique de peuplement dans la région du Haut-Sassandra. Thèse unique de doctorat en géographie, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan-Cocody, 286 p.
- ADRAO (1985). Station régionale riz irrigué. Synthèse des résultats (rapport interne non publié), Saint-Louis (Sénégal), 7 p.
- Adrian J. (1956). Les méthodes de dosage des principales vitamines hydrosolubles (1). *Annales de zootechnie, INRA/EDP Sciences*, 5 (4) : 295 - 334.
- Agassounon D.T.M., Gomez S., Tchobo F.P., Soumanou M.M. & Toukourou F. (2012). Essai de conservation de la tomate par la technique de la deshydratation impregnation par immersion (DII). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 : 657 - 669.
- Al Hassani T.A. & Persoons E. (1994). Bases Physiologiques et Agronomiques de la Production Végétale. In : Les rayonnements solaires et le fonctionnement du couvert végétal. Hatier-Aupelf, Uref, Paris, 26 - 48.

Références

- Alexandratos N. & Bruinsma J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. FAO. ESA Working Paper No. 12-03, Rome, 160 p.
- Alhag Dow M. (2006). Caractérisation fonctionnelle de la GDP-D-Mannose-3,5-epimerase et galactono-1,4-lactone deshydrogenase, enzyme de la voie de biosynthèse de la vitamine c chez la tomate. Mémoire de thèse en Sciences de la vie et de la Santé ; option Biologie Végétale, Université de Bordeaux 1, 245 p.
- Allison F. (1973). Soil organic matter and its role in crop production. Elsevier scientifique publishing company, chapter 22 « Green manuring and related practices », 445 - 460.
- Alvarez R. (2005). A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management*, 21 : 38 - 52.
- Amutha R., Karunakaran S., Dhanasekaran S., Hemalatha K., Monika R., Shanmugapriya P. & Sornalatha T. (2014). Isolation and mass production of biofertilizer (azotobacter and phosphobacter). *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 3(1), 79 - 80.
- ANADER (2015). Document de formation des étudiants sur l'itinéraire technique des cultures maraichère. Agence Nationale d'Appui au Développement Rural zone Daloa, 48 p.
- AOAC (1995). Official methods of Analysis of AOAC International, 16th ed. Method 970.12. Association of Official Analytical Chemists International, (USA Washington), DC. *Applied Soil Ecology*, 44 : 101 - 115.
- Ashton P.J. (1974). The effects of some environmental factors on the growth of *Azolla filiculoides* Lam. In : the Orange River Progress Report (Inst. for Environmental Sciences). University of the O.F.S. Bloemfontein, South Africa, 123 - 138.
- Bachir B. M., Louaileche H. & Mouhoubi Z. (2014). Antioxidant activity of eight tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) varieties grown in Algeria. *Journal of Food Technology Research*, 1(2) : 133 - 145.
- Barea J.M., Escudero J.L. & Azcón-Aguilar C. (1980). Effects of introduced and indigenous VA mycorrhizal fungi on nodulation, growth and nutrition of *Medicago sativa* in phosphate-fixing soils as affected by P fertilizers. *Plant Soil*, 54 :283 - 296.

Références

- Batamoussi M.H., Tovihoudji P.G., Tokore S.B.J.O.M., Boulga J. & Essegnon M.I. (2016). Effet des engrais organiques sur la croissance et le rendement de deux variétés de tomate (*Solanum lycopersicum*) dans la commune de Parakou (Nord Bénin). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 24(1) : 86 - 94.
- Bavay C. (2013). Adaptation des méthodologies d'évaluation sensorielle aux produits agroalimentaires à forte variabilité. Mémoire de thèse en Analyse sensorielle Laboratoire ; Science Alimentaire, Unité de Recherche GRAPPE, École Supérieure d'Agriculture d'Angers, France, 145 p.
- Beauchamp C.J. (1993). Mode d'action des Rhizobactéries favorisant la croissance des plantes et potentiel de leur utilisation comme agent de lutte biologique. *Phytoprotection*, 74 (1), 19 - 27.
- Becking J.H. (1979). Environmental requirements of *Azolla* for use in tropical rice production, Nitrogen and Rice. International rice Research Institute. Los Banos, Laguna, Philippines, 345 - 374.
- Bekkar B.K. (2014). Etude de l'effet des facteurs abiotiques et nutritionnels sur la production d'oospores chez *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. Mémoire de Thèse en Botanique ; Option Biologie et génétique de l'interaction plante hôte pathogène dans la protection des cultures. Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'El-Harrach, 82p.
- Benakmoum A. (2009). Effets du lycopène sur certains paramètres structuraux et fonctionnels chez le rat en croissance. Thèse pour l'obtention du Doctorat Option Sciences Alimentaires, École Nationale Supérieure Agronomique El Harrach Alger, Algérie, 114 p.
- Benard C. (2009). Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en polyphénols chez la tomate. Mémoire de thèse de doctorat en Agronomie et Environnement ; option Sciences Agricoles, Nancy Université-INRA, 265 p.
- Bjorn S. & Matthias Z. (2003). Associations Between Cyanobacteria and Mosses ; Cyanobacteria in Symbiosis, 137 - 152.
- Blondeau R. (1981). Fixation biologique de l'Azote atmosphérique. Vuibert ed. Paris, France, 102 p.

Références

- Bromblet H. & Somaroo G. (2015). Les techniques de compostage de déchets d'origine naturelle en Afrique et dans les caraïbes, présentation synthétique de l'état des lieux et des retours d'expériences. Plateforme Re-Sources /Réseau pour une gestion durable des déchets, 12 p.
- Brou Y. T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques. Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 212 p.
- Campos C.A.B., Fernandes P.D., Gheyi H.R., Blanco F.F., Goncalves C.B. & Campos S.A.F. (2006). Yield and fruit quality of industrial tomato under saline irrigation. *Scientia Agricola*, 2 : 63 - 69.
- Carrapiço F. (2007). *Azolla* as a superorganism: its implication. Biodata, in symbiotic studies, 225-241.
- Causse M., Caranta C., Saliba-colombani V., Moretti A., Danidiaux R. & Rousselle P. (2000). Valorisation des ressources génétiques de la tomate par l'utilisation de marqueurs moléculaires. *Cahiers Agriculture* 9 : 197 - 210
- Chabalier P.F., Kerchove de V.V. & Macary H.S. (2007). Guide de la fertilisation organique à la réunion. *Co-éd. CIRAD*, Chambre d'agriculture de la Réunion, 302 p.
- Chanforan C. (2010). Stabilité de microconstituants de la tomate (composés phénoliques, caroténoïdes, vitamines C et E) au cours des procédés de transformation : études en systèmes modèles, mise au point d'un modèle stoechio-cinétique et validation pour l'étape unitaire de préparation de sauce tomate. Mémoire de thèse de Doctorat en Sciences des Procédés ; option Sciences des Aliments, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, 399 p.
- Chaux C.I. & Foury C.I. (1994). Cultures légumières et maraîchères. Tome III : Légumineuses potagères, légumes fruits. Tee et Doc Lavoisier, Paris. 563 p.
- Chippaux J-P. (2006). Les serpents d'Afrique occidentale et centrale. Institut de recherche pour le développement, collection Faune et Flore tropicales 35, édition revue et augmentée Paris, 311 p.

Références

- Chirio L. & Lebreton M. (2007). Atlas des reptiles du Cameroun. Publications des scientifiques de l'IRD, 686 p.
- CNRA (2016). Répertoire des variétés améliorées de cultures vivrières. Edition 2016, Centre National de Recherche Agronomique, 53 p.
- Craige J.S. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23 : 371 - 393.
- Cronberg G. & Annadotter H. (2006). Manual on aquatic cyanobacteria. A photo guide and a synopsis of their toxicology, International Society for the Study of Harmful Algae and the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation, 106 p.
- Culot M. & Lebeau S. (2000). Compostage, une gestion inconnue des déchets. Coopération Régionale pour le développement des productions horticoles en Afrique, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Bulletin de liaison numéro 17 : 52 - 66.
- Davies J.N. & Hobson G.E. (1981). The constituents of tomato fruit - the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 15(3) : 205 - 280.
- DDrinkwater L.E. & Snapp S.S. (2007). Nutrients in agroecosystems : rethinking the management paradigm. *Advances in Agronomy*, 92 : 163-186.
- De Broglie L.A. & Guérout D. (2005). Tomates d'hier et d'aujourd'hui. Edition : Hoëbeke ; Collection : BEAUX LIVRES HO Langue, Paris, 143 p.
- Devisscher S. (2018). Propriétés et valorisation du compost. <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/duce/compost1.htm> [consulté le 02/02/2018] 1086 - 1092.
- Diane L. (2004). Approvisionnement en pollen et en nectar des colonies de bourdons *Bombus terrestris*. Ecologie comportementale et modélisation. Implications pour la pollinisation des fleurs de tomate en serre. Mémoire de Thèse en Biologie, Université de Rennes, 293 p.

Références

- Diomande M., Grogan N. & Kouame K.B. (2017). Effet des filtrats de fiente de poulet et boue de vache sur les propriétés physico-chimiques et fonctionnelles de farine d'algues vertes (*Azolla filiculoidales* et *Azolla caroliniana*). *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(10) : 1535 - 1548.
- Djogbede A.Z.K., Hinvin L.C. & Fiogbe E.D. (2012). Effets de substitution des engrais chimiques par *Azolla pinnata* en riziculture au Nord Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(6) : 3027 - 3044.
- Dorais M. & Alsanius B. (2015). Advances and Trends in Organic Fruit and Vegetable Farming Research. *Horticultural Reviews*, 43 : 185 - 268.
- Dossou J., Soule I. & Montcho M. (2007). Évaluation des caractéristiques physico-chimiques et sensorielles de la purée de tomate locale produite à petite échelle au Bénin. *Tropicultura*, 25 : 119 - 125.
- Doucet R. (2001). La science agricole : climat, sols et production végétale du Québec. Edition Berger, Québec, 699 p.
- Dufour D., Larssonneur S., Alarçon F., Brabet C. & Chuzel G. (1996). Improving the bread making potential of cassava sour starch. In: Dufour D., G.M. O'Brien & R. Best (Eds). Cassava flour and starch: progress in research and development. International Meeting on Cassava Flour and Starch, 133 - 142.
- Dufour S., Béné J.C.K., Dao D. & N'guessan E. (2015). Gestion durable de la faune et des ressources cynégétique en Côte d'Ivoire. Rapport pour les Etats généraux de la forêt, de la faune et des ressources en eau, 101 p.
- Falisse A. & Lambert J. (1994). La fertilisation minérale et organique. In : T. A. El Hassani, E. Persoons (Eds.), *Agronomie moderne, bases physiologiques et agronomiques de la production végétale*, INRA, Paris, 131 - 169.
- FAO (1978). La multiplication de *Azolla* et son utilisation dans l'agriculture. Bulletin pédologique 41, FAO, ROME, 68 p.
- FAO (1987). Guide sur les engrais et la nutrition des plantes. Service des engrais et de la nutrition azotée, Rome, 190 p.

Références

- FAO (2003). Les engrais et leurs applications. Précis à l'usage des agents de vulgarisation agricole ; Quatrième Edition, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rabat, 84 p.
- FAO (2005). L'Etat d'insécurité alimentaire dans le monde. Eradiquer la faim dans le monde pour réaliser les objectifs du Millénaire pour le développement, Rome, Italie, 40 p.
- FAO (2005). Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. Documents de travail sur les terres et les eaux, Rome, 48 p.
- FAO (2012). West African Food Composition Table ; Table de composition des aliments d'Afrique de l'Ouest. (Italie, Rome), 148 p.
- Fondio L., Djidji A.H., N'gbesso F.D P.M. & Kone D. (2013). Evaluation de neuf variétés de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) par rapport au flétrissement bactérien et à la productivité dans le Sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biology and Chemistry Sciences*, 7(3) : 1078 - 1086.
- Franche C. & Cohenbazire G. (1985). The structural nifgenes of four symbiotic *Anabaena Azollae* show a 'highly conserved physical arrangement. *Plant Science*, 39 : 125 - 131.
- Franche C., Lindström K. & Elmerich C. (2009). Nitrogen-fixing bacteria associated with leguminous and non-leguminous plants. *Plant Soil*, 321 : 35 - 59.
- Gage D.J. (2004). Infection and invasion of roots by symbiotic, nitrogen-fixing rhizobia during nodulation of temperate legumes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 68(2) : 280 - 300.
- Garcia E. & Barrett D.M. (2006). Evaluation of Processing Tomatoes from Two Consecutive Growing Seasons : Quality Attributes, Peelability and Yield. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30(1) : 20 - 36.
- Gianinazzi S., Gollotte A., Binet M.N., van Tuinen D., Redecker D. & Wipf D., 2010. Agroecology : the key role of arbuscular *mycorrhiza* in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20 : 519 - 530.
- Giller K.E., Cadisch G. & Palm C. (2002). The North-South divide: Organic wastes or resources of nutrient management. *Agronomy*, 22 : 703 - 709.

Références

- Giordano L.B., Silva J.B.C. & Barbosa V. (2000). Escolha de cultivars e plantio. In : Silva JBC and Guarding LB (org) *Tomatoe para processamento industrial Brasilia*. Emrapa, 36 - 59.
- Giovannucci E. (1999). Tomatoes, tomato-based products, lycopene, and cancer : Review of the epidemiologic literature. *Journal of the National Cancer Institute*, 91(4) : 317 - 331.
- Giridhar K. & Rajendran D. (2013). Cultivation and usage of *Azolla* as supplemental feed for dairy cattle. In : Value addition of feed and fodder for dairy cattle ; Annal Report, Institut national de nutrition et de physiologie animales, 32 - 34.
- Granges A., Gillioz J.M., Quentin H. & Ahmed O. (2006). Old tomato varieties : agronomic, analytical and taste values. *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture*, 38(2) : 97 - 103.
- Groga N., Akedrin T.N., Dro B., Kouadio K.P.F., Akaffou D.S., Kouadio Y.J. & Allassane O. (2018). Contribution des biotechnologies à la sécurité alimentaire : cas du biofertilisant organique (symbiose *Anabaena-Azollae*, *Azolla filiculoides*) sur la fertilisation et le développement d'*Oryza sativa* (riz CB-one) en Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 23 : 1155 - 1165.
- Groga N., Diomande M., Beugre G.A.M., Ouattara Y. & Akaffou D.S. (2018). Etude comparative de la qualité de la symbiose (*Anabaena azollae*, *Azolla caroliniana*), du compost et du NPK sur la croissance végétative et le rendement de la tomate (*Lycopersicon esculentum mill. Solanacée*) à Daloa (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 129 : 13004 - 13014.
- Grolier P. (1999). Antioxdants in the tomato fruit. In : Role and control of antioxidants in the tomato processing industry, Second bulletin on the advancement of research. A European Commission Concerted Action Program, 4 p.
- Grolier P., Bartholin G., Broers L., Carisveyrat C., Dadomo M., Di Lucca G., Dumas Y., Meddens F., Sandei L. & Schuch W. (2000). Les anti-oxydants de la tomate et leur biosynthèse. In: Les anti-oxydants de la tomate et ses dérivés et leur bienfaits pour la santé. Le livre blanc de la tomate, action concertée de la Commission Européenne, 3 p.
- Gueu S. (2007). Traitement de la pollution métallique et organique par les charbons actifs des coques de noix de coco et des graines de palmistes. Thèse de Doctorat 3^{ième} cycle en

Références

- Sciences des structures de la matière et de la technologie, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 109 p.
- Guinan K.J., Sujeeth N. & Copeland R.B. (2012). Discrete roles for Extracts of *Ascophyllum nodosum* in enhancing plant growth and tolerance to abiotic and biotic stresses. *Acta Horticulturae*, 1009 : 127 - 136.
- Hall R. D., Brouwer I.D. & Fitzgerald M. A. (2008). Plant metabolomics and its potential application for human nutrition. *Physiol Plant* 132 : 162 - 175.
- Haller W.T., Sutton D.L. & Barlome W.C. (1974). Effects of salinity on the growth of several aquatic macrophytes. *Ecology*, 55: 891 - 894.
- Hallmann E. (2012). The influence of organic and conventional cultivation systems on the nutritional value and content of bioactive compounds in selected tomato types. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(14) : 2840 - 2848.
- Hanson P., Chen J. T., Kuo C. G., Morris R. & Open R.T. (2001). Suggestions sur les pratiques culturales de la tomate. *Learning center*, 1 - 9.
- Hassan M.R. & Chakrabarti R. (2009). Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture : A review. FAO Fisheries and Aquaculture technical paper, FAO, Italy, Rome, 531 p.
- Hédji C.C., Gangbazo D.N.S.K., Houinato M.R. & Fiogbé E.D. (2014). Valorisation de *Azolla* spp, *Moringa oleifera*, son de riz, et de coproduits de volaille et de poisson en alimentation animale : synthèse bibliographique. *Journal of Applied Biosciences*, 81 : 7277 - 7289.
- Hills L.V. & Gopal B. (1967). *Azolla primaeva* and its phylogenetic significance. *Canadian Journal of Botany*, 45 : 1179-1191.
- Hoquet T. (2005). Les Fondements de la botanique. Linné et la classification des plantes. Biologie du XXI^e siècle : évolution des concepts fondateurs, Vuibert (Paris), 290p.
- IITA. (1981). Analyse des prélèvements pédologiques et végétaux. Manuel 1, Oyo-Road, Nigeria, 66 p.

Références

- Inckel M., Smet P.D., Tersmette T. & Veldkamp T. (2005). La fabrication et l'utilisation du compost. Sixième Edition, Wageningen, Agromisa Foundation, collection ; Agrodok séri N° 8, 73 p.
- INS (Institut Nationale des Statistiques) (2014). Recensement général de la population et de l'habitat. Résultats globaux, Abidjan, 22 p.
- Janes R. (1996). The effects of floating mats of *Azolla filiculoides* Lam. and *Lemna minuta* Kunth on the growth of submerged macrophytes. *Hydrobiologia*, 340(1) : 23 - 26.
- Jeffries P., Gianinazzi S., Perotto S., Turnau K. & Barea J.M. (2003). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 37 : 1-16.
- Jordan D.C. (1984). *Rhizobiaceae*. In : Kreig, N R (ed) Bergey's manual of systemic Bacteriology, 1 : 234 - 256.
- Judd W.S. & Cambell C.S. (2002). Une Perspective Phylogénétique. Botanique Systématique. Direction des Bibliothèques et de la Documentation, De Boeck Université, Paris, 467 p.
- Kasongo L.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.
- Kataria K., Gupta A., Rath G., Mathur R.B. et Dhakate S.R. (2014). *In vivo* wound healing performance of drug loaded electrospun composite nanofibers transdermal patch. *International Journal of Pharmaceutics*, 469 :102 - 110.
- Kathirvelan C., Banupriya S. & Purushothaman M.R. (2015). *Azolla* an alternate and sustainable feed for livestock. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 4(4) : 1153 - 1157.
- Kautz T., Wirth S. & Ellmer F. (2004). Microbial activity in a sandy arable soil is governed by the fertilization regime. *European Journal of Soil Biology*, 40 : 87 - 94.

Références

- Khan M.M. & Martell A.E. (1967). Metal ion and metal chelate catalyzed oxidation of ascorbic acid by molecular oxygen. *Journal of the American Chemical Society*, 89 : 4176 - 4185.
- Kitabala M. A., Tshala U. J., Kalenda M. A., Tshijika I. M. & Mufind K. M. (2016). Effets de différentes doses de compost sur la production et la rentabilité de la tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) dans la ville de Kolwezi, Province du Lualaba, RD Congo. *Journal of Applied Biosciences*, 102 : 9669 - 9679
- Koch G. (2018). Effet du stress hybride sur la croissance de la tomate : une étude multi-échelle : de la cellule à la plante entière pour une meilleure compréhension des interactions entre les échelles. Mémoire de thèse en Biologie ; Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, 244 p.
- Koffi A., Brou L., Kpangni B, Moyabi S., Tapé C. & Moustapha. (2009). Evaluation approfondie de la sécurité alimentaire des ménages ruraux en Côte d'Ivoire. Programme alimentaire mondial, Bureau de pays, rapport final, Côte d'Ivoire, 79 p.
- Koffie B.C.Y. & Kra K.S. (2013). La region du Haut-Sassandra dans la distribution des produits vivriers agricoles en Côte d'Ivoire. Institut de Geographic Tropical, Université Félix Houphouet-Boigny de Cocody / Abidjan / Cote d'Ivoire. *Revue de Geographic Tropicale et d'Environnement*, 2 : 9 p.
- 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*. Mémoire de thèse en Biochimie et Technologies des Aliments ; Université Nangui Abrogoua (Côte d'Ivoire), 182 p.
- Kolev N. (1976). Les cultures maraichères en Algérie. Légumes Fruits. Edition : Tome 1 ; Ministre de l'Agriculture et des Reformes Agricoles. 52 p.
- Kotaix A.J.A., Angui T.P., Pierre C.Z.K., Diby N.L., Dao D. & Bonfoh B. (2013). Effet de l'engrais organique liquide « DRAGON 1 », sur le développement de la tomate au Sud et au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 25 (1) : 1 - 16.
- Kouakou C.V. (2019). Importance des fragments de forêt dans la conservation des primates non-humains en Côte d'Ivoire : cas de la forêt sacrée et des forêts villageoises à

Références

- Gbétitapéa dans la région du Haut-Sassandra. Mémoire de thèse en Ecologie, Biodiversité et Evolution ; option Primatologie, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 132 p.
- Kouassi J.B., Massara C.C., Sess D.E., Tiahou G.G. & Djohan F.Y. (2013). Détermination des teneurs en Magnésium, Potassium, Manganèse et Sodium de deux variétés de gombo. *Journal of Applied Biosciences*, 67 : 5219 - 5227.
- Kuti J.O. & Konuru H.B. (2005). Effects of genotype and cultivation environment on lycopene content in red-ripe tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(12) : 2021 - 2026.
- Lévêque C. (1999). Les introduction d'espèces dans les milieux naturels et leurs conséquences. In : Poisson des eaux continentales africaines, Diversité, Ecologie, Utilisation par l'homme (Lévêque C. et D Paugy, eds). Institut de recherche pour le développement (IRAD), Cameroun, 351 - 364.
- Lhoussaine M. (2000). Les engrais minéraux caractéristiques et utilisations. In : transferts de technologie en agriculture, MADREF/DERD, 72, Rabat (Maroc), 1-4.
- Li Y.X., Wijesekara I., Li Y. & Kima S.K. (2011). Phlorotannins as bioactive agents from brown algae. *Process Biochemistry*, 46 : 2219 - 2224.
- Ligban R., Gone L. D., Kamagate B., Saley M. B. & Biemi J. (2009). Processus hydrogéochimique et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3(1) : 38 - 47.
- Liptay A. & Sikkema p. (1998). Varying fertigation volume modifies growth of processing tomato transplants produced in the greenhouse and affects leaching from plug trays. *Hort Technology*, 8(3) : 378 - 380.
- Liu Z. & Lijun L. (2011). Effects of Plant growth regulators and saccharide on in vitro plant and tuberous root regeneration of Cassava. *Journal of Plant Growth Regulation*, 30(1) : 11 - 19.
- Lumpkin T.A. & Plucknett D.L. (1982). *Azolla* as a green manure. Westview Tropical Agriculture Series, Westview Press, Boulder Co, USA. 230 p.

Références

- Luthria D.L., Mukhopadhyay S. & Krizek D. (2006). Content of total phenolics and phenolic acids in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruits as influenced by cultivar and solar UV radiation. *Journal Food Composition Analysis*, 19 : 771 - 777.
- Mario L. (2010). Les règles de bases pour l'utilisation foliaire des fertilisants en cultures maraîchère. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Québec, 2 p.
- Mario L. (2016). La prévention des carences en éléments mineurs et secondaires en sol organique. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Québec, 49 p.
- Martínez-Valverde I., Periago M.J., Provan G. & Chesson A. (2002). Phenolic compounds, lycopene and antioxidant activity in commercial varieties of tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(2) : 323 - 330.
- Mazoyer M. (2002). Larousse agricole : le monde paysan au 21^{ème} siècle, 4^{ème} édition, Paris, 767 p.
- Miller P. (1768). The gardeners dictionary abridged. *Genera Plantarum*, 8 (3) : 376 - 377.
- MINAGRI (Ministère de l'Agriculture) (2010). Ministère de l'Agriculture, Novembre 2010. Annuaire des statistiques agricoles, Abidjan, Direction des statistiques, de la documentation et de l'informatique, 73 p.
- MINEF (Ministère de l'Environnement et de la Forêt). (2014). Diversité Biologique de la Côte d'Ivoire. Cinquième rapport national sur la biodiversité biologique, 106 p.
- Mohapatra B., Vera D.K., Sen A., Pandet B.B & Asthir B. (2013). Les bio-engrais – une passerelle vers une agriculture durable. *Kheti populaire*, 1(4) 97 - 106.
- Moore A.W. (1969). *Azolla* : biology and agronomic significance. *Botanical Review*, 35 : 17 - 35.
- Morsli S. (2018). Proposition d'un modèle de culture biologique Tomate/Datura et effet des biopesticides (métabolites secondaires) sur les bioagresseurs. Mémoire de thèse en Zoologie Agricole et forestière ; Spécialité : Protection des Végétaux Zoologie, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, El Harrach (Algérie), 129 p

Références

- Moussa A.A. (2006). Analyse agro-physiologique de la réponse du cotonnier (*Gossypium hirsutum*) aux dégâts de lépidoptères carpophages dans les savanes du Nord Cameroun. Mémoire de thèse en Biologie et Agronomie ; Ecole Nationale Supérieure Agronomique De Rennes (France) 144 p.
- MRE (Ministère des Relations Extérieures, de la Coopération et du Développement). (2002). Momento de l'Agronome (7 edn). MRECD : Paris, 379 p.
- Mulaji K.C. (2011). Utilisation des composts de biodéchets ménagers pour l'amélioration de la fertilité des sols acides de la province de Kinshasa (République Démocratique du Congo). Mémoire de thèse de doctorat en Agro-Biologie et Technologie, Université de Liège-Gembloux (Belgique), 220 p.
- Müller S. (2006). Prolifération spectaculaire d'*Azolla filiculoides* (Azollaceae, Pteridophyta) dans le canal de Jouy pres de Metz (Lorraine, France) à l'automne 2005. *Bulletin de la Société des naturalistes luxembourgeois*, 107 : 31 - 38.
- N'dah E. (2012). Plan de gestion des pestes et pesticides. Projet d'Appui au Secteur de l'Agriculture de Cote d'Ivoire (PSAC), rapport final 1, Cote d'Ivoire, 55 p.
- N'Guessan A. H., N'Guessan. K. F., Kouassi. K. P., Kouamé N. N. & N'Guessan. P.W. (2014). Dynamique des populations du foreur des tiges du cacaoyer, *Eulophonotus myrmeleon*. Felder (Lépidoptère : Cossidae) dans la région du Haut-Sassandra en Côte d'Ivoire, 9 p.
- Naika S., Van Lidt de J.J., De Goffau M., Hilmi M. & Van Dam B. (2005). La culture de la tomate, production, transformation et commercialisation. Cinquième Edition révisée, Wageningen, Agromisa Foundation, collection « Agrodok », 105 p.
- Nandabalan K. & Kannaiyan S. (1986). Effect of salinity on *Azolla pinnata*. *International Rice Research Newsletter*, 11(3) : 9.
- Nour V., Trandafir M.E.I. & Ionica (2013). Antioxidant compounds, mineral content and antioxidant activity of several tomato cultivars grown in Southwestern Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*, 41(1) : 136 - 142.
- Oboulbiga E.B., Parkouda C., Sawadogo-Lingani H., Compaoré E.W.R., Sakira A.K. & Traoré A.S. (2017). Nutritional Composition, Physical Characteristics and Sanitary Quality of

Références

- the Tomato Variety Mongol F1 from Burkina Faso. *Food and Nutrition Sciences*, 8 : 444 - 455.
- OFEV & OFAG (2012). Eléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique n° 1225. Office fédéral de l'environnement, Berne, 65 p.
- Ohyama T. (2006). Introduction. In : Biofertilizer Manual. Japan Atomic Industrial Forum (JAIF), Japan, 1 - 2.
- Ojetayo A.E., Olaniyi J.O., Akanbi W.B. & Olabiyi T.I. (2011). Effect of fertilizer types on nutritional quality of two cabbage varieties before and after storage. *Journal of Applied Biosciences*, 48 : 3322 - 3330.
- Oka Y. (2010). Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments. *Applied Soil Ecology*, 44 : 101 - 115.
- Oliveira A.B., Moura C.F.H., Gomes-Filho E., Marco C.A., Urban L. & Miranda M.R.A. (2013). The Impact of Organic Farming on Quality of Tomatoes Is Associated to Increased Oxidative Stress during Fruit Development. *Bibliothèque nationale de médecine des États-Unis Instituts nationaux de la santé*, 8(2) : 56354.
- Peters G.A., Calvert H.E., Kaplan D., Ito O. & Toia R.E. (1982). The *Azolla-Anabaena* symbiosis: morphology, physiology and use. *Israel Journal of Botany*, 31 : 305 - 323.
- Philouze & Hedde J. I. (1995). The tomato. *Scientific American*, 59, 85 - 146.
- Pierre B., Hubert B., Magali C., Patrick D., Jacques F., Laure G., Dominique P., Marie-Noëlle P. & Anne-Marie P. (2014). Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des Mafor. Rapport final de l'ESCO ; Matières fertilisantes d'origine résiduaire, 115 - 363.
- Pierre R.A. (1993). Les biofertilisants fixateurs d'azote en riziculture : potentialités, facteurs limitants et perspectives d'utilisation. In : M. Raunet (ed.) Bas-fonds et riziculture, 327 - 348.
- Pierre R.A. (1996). Biology and management of the floodwater ecosystem in wetland ricefields. International Rice Research Institute, Manila, Philippines. Office de la recherche scientifique et technique d'outre-mer, Paris, France, 250 p.

Références

- Pinela J., Barros L., Carvalho A.M. & Ferreira I.C.F.R. (2012). Nutritional composition and antioxidant activity of four tomato (*Lycopersicon Esculentum* L.) farmer' varieties in North Eastern Portugal homegardens. *Food Chemistry and Toxicology*, 50(3-4) : 829 - 834.
- Polese K.M. (2007). La culture de tomate. Edition Artémis, Paris, 95 p.
- Pousset J. (2011). Engrais verts et fertilité des sols - Principes agronomiques, Pratiques agricoles. Productions végétales et grandes cultures, Agriproduction Editions France Agricole, 3e édition, 398 p.
- Published N. (2010). The Influence of Fruit Load on the Tomato Pericarp Metabolome in a *Solanum chmielewskii* Introgression Line Population. *Plant Physiology*, 154 : 1128 - 1142.
- Rahagarison (2005). Etude bibliographique de l'*Azolla* ou la ramilamina plante fertilisatrice d'Azote (N₂). *Taloha*, 14 - 15.
- Raja W., Rathaur P., John S.A. & Ramteke P.W. (2012). *Azolla* : an aquatic pteridophyte with great potential. *International Journal of Research in Biological Sciences*, 2(2) : 68-72.
- Reddy K.R., Wetzel R.G. & Kadlec R.H. (2005). Biogeochemistry of phosphorus in wetlands. *Agriculture and the environment*, 263 - 316.
- Renaud V. (2003). Tous les légumes : courants, rares ou méconnus, cultivables sous nos climats. Les Editions EUGEN ULMER, Paris, 135 - 137.
- Roger P.A. & Ladha J.K. (1992). Biological N₂ fixation in wetland rice fields : Estimation and contribution to nitrogen balance. *Plant and Soil*, 141 : 41 - 55.
- Sangaré A., Koffi E., Akamou F. & Fall C.A. (2009). Etat des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture. Second rapport national, Rapport, 65 p. [http:// www.fao.org/tempref/AG/agp/countryreports/CotedIvoireFinalReport.pdf](http://www.fao.org/tempref/AG/agp/countryreports/CotedIvoireFinalReport.pdf).
- Schafer J.L. (1999). Amélioration du système de culture du Macabo, *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott, en pays Bamiléké (Ouest-Cameroun). *Cahiers Agriculture* 8(1) : 9 - 20.

Références

- Schvartz C., Muller J.C. & Decroux J. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée. 2^e édition, France agricole, Paris, 414 p.
- Shankara N., Barbara V.D. & Arwen F. (2005). La culture de la tomate, production, transformation et commercialisation. Cinquième édition révisée, Agromisa Foundation, collection, Agrodok, 105 p.
- Singbo G. A., Nouhoheflin T. & Irissou L. (2004). Etude des perceptions sur les ravageurs des légumes dans les zones urbaines et périurbaines du sud Bénin. Projet Légumes de qualité, Rapport IITA-INRABOBEPAB, Bénin, 21 p.
- Smith S.E. & Read D.J. (2008). Mycorrhizal symbiosis. 3rd edn. Academic Press. London, 750 p.
- Soro S., Doumbia M., Dao D., Tschannen A. & Girardin O. (2007). Performance de six cultivars de tomates *Lycopersicon esculentum* Mill. contre la jaunisse en cuillère des feuilles, le flétrissement bactérien et les nématodes à galles. *Science et Nature*, 4(2) : 123 - 130.
- Sulbarán B., Sierra E., Ojeda de Rodriguez G., Berradre M., Fernandez V. & Pena J. (2011). Evaluacion de la actividad antioxidante del tomate crudo y procesado. *Revista de la Facultad de Agronomia*, 28 : 273 - 291.
- Sutharsan S., Nishanthi S. & Srikrishnah S. (2014). Effects of Foliar Application of Seaweed (*Sargassum crassifolium*) Liquid Extract on the Performance of *Lycopersicon esculentum* Mill. In Sandy Regosol of Batticaloa District Sri Lanka. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 14(12) : 1386 - 1396.
- Temgoua E., Tsafack N.H., Ngnikam E., Gouana T.R. & Dongmo Z.G.R. (2017). Fertilisation du maïs (*Zea mays* L.) à base d'urines humaines hygiénisées dans un oxisol de l'Ouest Cameroun. *International Journal of Biology and Chemistry Sciences*, 11(5) : 2071-2081.
- Thayyil & Pradeepkumar (2017). Fertigation - the Key Component of Precision Farming. *Journal of Tropical Agriculture*, 54(2) :103 - 114.
- Thomas C.D., Cameron A. & Green R.E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427 (6970) : 145 - 148.

Références

- Toor R.K., Savage G.P. & Lister C.E. (2006). Seasonal variations in the antioxidant composition of greenhouse grown tomatoes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(1) : 1 - 10.
- Toussaint A. & Baudoin J.P. (2010). Biodiversité chez la tomate, stratégie de conservation et valorisation de la collection « Luc Fichot ». Rapport final - Année académique 2009-2010 ; Gembloux agro bio tech, Belgique, 105 p.
- Turhan A. & Seniz V. (2009). Estimation of certain chemical constituents of fruits of selected tomato genotypes grown in Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, 4(10) : 1086 - 1092.
- Useni S.Y., Baboy L.L., Nyembo K.L. & Mpundu M.M. (2012). Effets des apports combinés de biodéchets et de fertilisants inorganiques sur le rendement de trois variétés de *Zea mays* L. cultivées dans la région de Lubumbashi. *Journal of Applied Biosciences*, 54 : 3935 - 3943.
- Useni S.Y., Chukiyabo K.M., Tshomba K.J., Muyambo M.E., Kapalanga K.P., Ntumba N.F., Kasangij K.P., Kyungu K., Baboy L.L., Nyembo K.L. & Mpundu M.M. (2013). Utilisation des déchets humains recyclés pour l'augmentation de la production du maïs (*Zea mays* L.) sur un ferralsole du sud-est de la RD Congo. *Journal of Applied Biosciences*, 66 : 5070 - 5081.
- Val'hor. (2017). *Azolla filiculoides* Lam. In : Code de conduite, plantes envahissantes, France, 6 p.
- Van Hove C., Diara H.F. & Godard P. (1983). *Azolla* en Afrique de l'Ouest. In : West Africa. Ed. C Van Hove. Ed Oleffe, Gourt St Etienne, Belgium, 56 p.
- Van Vuuren D.P., Bouwman A.F. & Beusen A.H.W. (2010). Phosphorus demand for the 1970-2100 period : a scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change*, 20 : 428 - 439.
- Vessey J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizer. *Plant Soil*, 255 : 571 - 586.

Références

- Wei W.X., Jin G.Y. & Zhang N. (1986). Preliminary report on *Azolla* hybridization studies (in Chinese). *Bull Fujian Academy of Agricultural Sciences*, 1 : 73 - 79.
- William G. (2003). Physiologie végétale. Editions De Boeck Université, rue des Minimes 39, B-1000 Bruxelles, 110 - 115.
- Yehouessi L.W. (2012). Etude des performances agronomiques de la culture de tomate de contre saison dans la zone côtière du sud-Bénin (Cotonou - Pahou - grand-popo). Mémoire de thèse en Sciences Agronomiques ; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 37p.
- Zaoui E. & Brun G. (2011). Efficience de la fertilisation : nouveau défi pour l'agriculture moderne. *Revue professionnelle des filières fruits et légumes ; Agriculture du Maghreb*, n° 51, 139 p.
- Zodape S.T., Gupta A., Bhandari S.C., Rawat U.S., Chaudhary D.R., Eswaran K. & Chikara J. (2011). Foliar application of seaweedsap as biostimulant for enhancement of yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Scientific & Industrial Research*, 70(3) : 215 - 219.



ANNEXES



Annexe 1 : Plants de tomate en alvéole prêt à être repiqués (21^{ème} jour après semis) 1cm

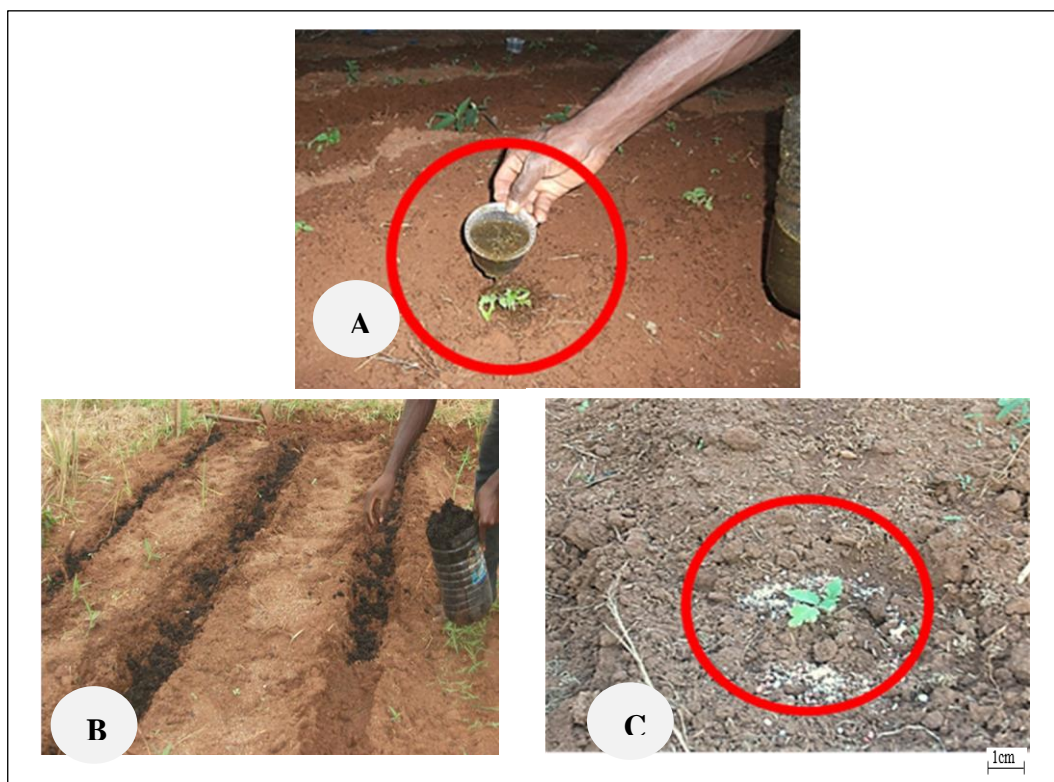


Annexe 2 : Parcelle expérimentale pour la culture de tomate (28^{ème} jour après semis) 1cm



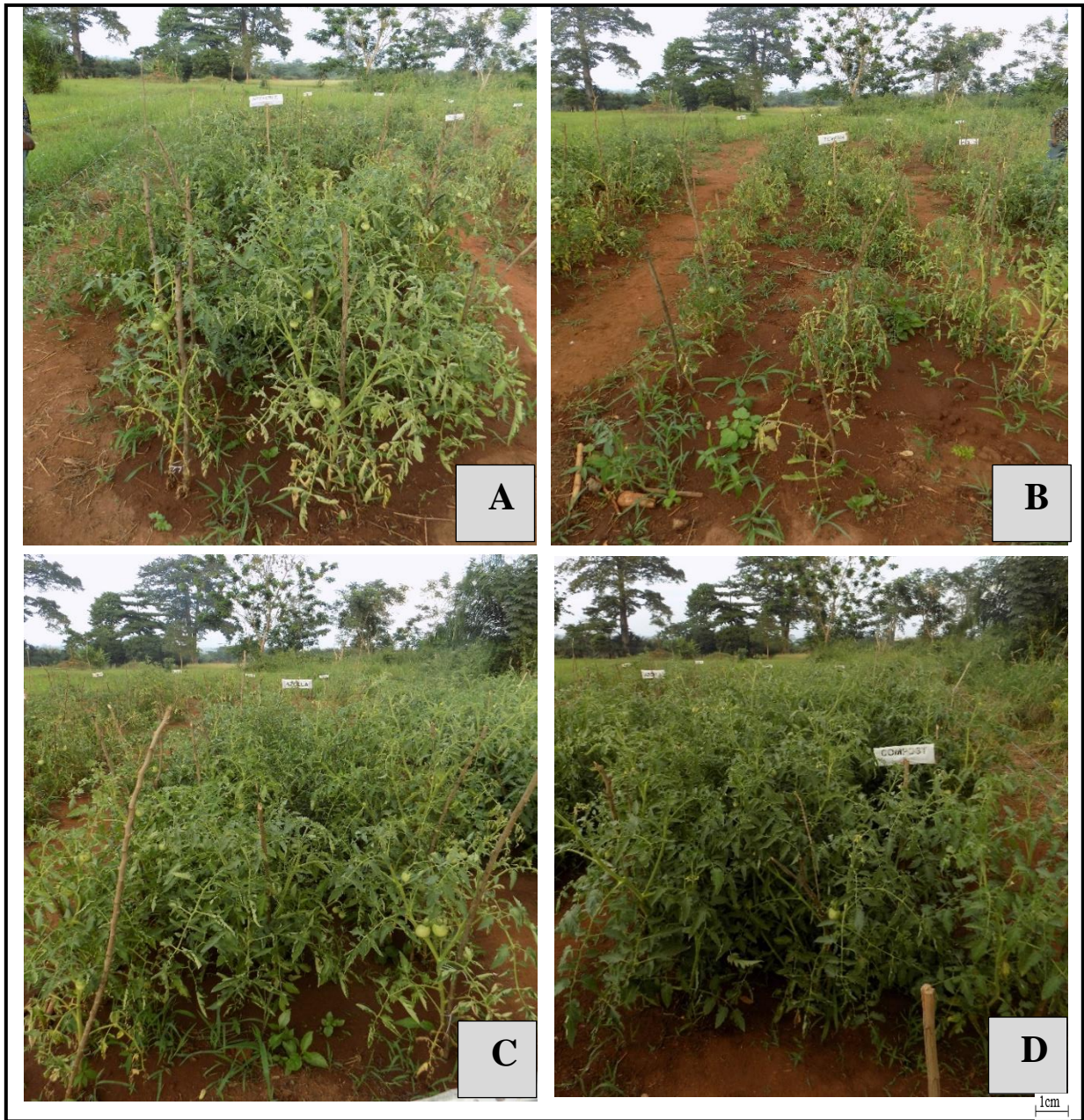
Annexe 3 : Mesure des paramètres de croissances de la tomate

A : Taille de la tige ; B : Longueur de la feuille ; C : Diamètre du collet



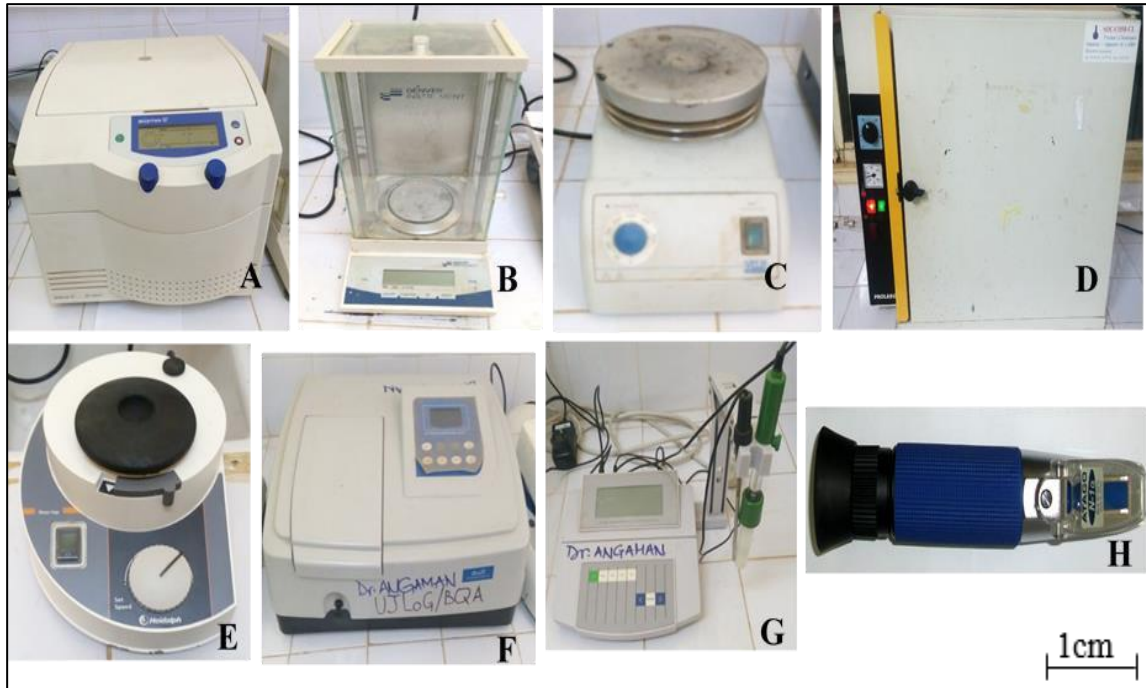
Annexe 4 : Amendement des parcelles avec les differents fertilisants

A : amendement avec *Azolla* ; B : amendement avec compost ; C : amendement avec NPK



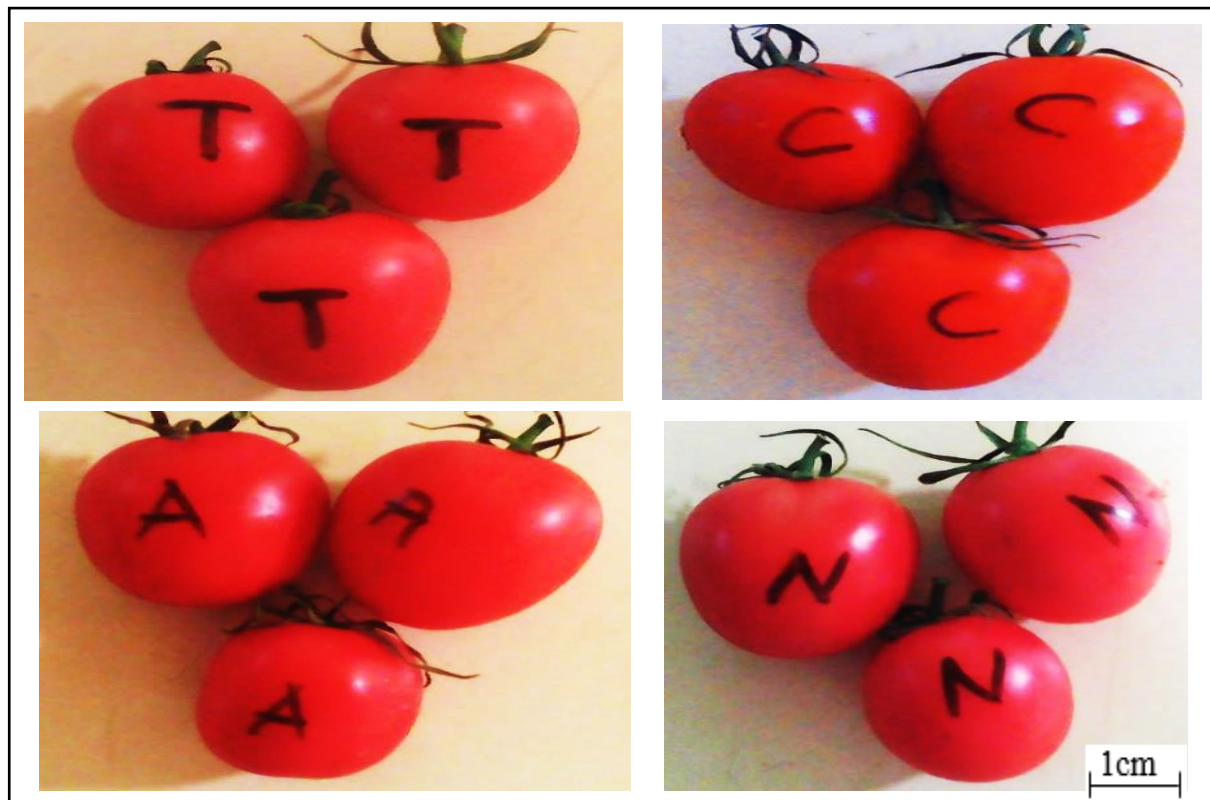
Annexe 5 : Planches de tomate après 2 mois de repiquage

A : NPK ; B : Témoin ; C : *Azolla* ; D : Compost



Annexe 6 : Quelques matériels utilisés dans le cadre de l'étude

A : centrifugeuse ; B : balance de précision ; C : plaque chauffante ; D : étuve ; E : vortex ; F : spectrophomètre G : pH-mètre ; H : refractomètre



Annexe 7 : Fruits de tomate (Boomerang F1) traités avec les différents fertilisants

T : tomates issues des plants du témoin ; C : tomates issues des plants fertilisés avec du compost ; A : tomates issues des plants fertilisés avec *Azolla caroliniana* ; N : tomates issues des plants fertilisés avec du NPK.



Annexe 8 : *Azolla caroliniana* cultivée avec le filtrat de fiente de poulet

1cm



Annexe 9 : *Azolla filiculoides* cultivée avec le filtrat de fiente de poulet

1cm

Annexe 10 : Fiche de notation pour les tests hédoniques

TEST D'ACCEPTANCE

Code de l'échantillon Nom : Séance N° Date :
Prénom :

Tranche d'âge : 20-30 30- 40 40-50 50-60
Sexe F M

Instructions : goûtez le produit servi et cochez la case correspondant à votre impression

I. **COULEUR**

- Très rouge
- Rouge
- Peu rouge
- Pas rouge
- Indifférent

II. **ACIDITÉ**

- Très acide
- Acide
- Peu acide
- Pas acide
- Indifférent

III. **GOUT**

Très salé

Salé

Peu salé

Pas salé

Fade

IV. **CONSISTANCE = FERMETÉ**

Très ferme

Ferme

Peu ferme

Pas ferme

Indifférent

V. **ODEUR = SENTEUR = PARFUM**

Très prononcée

Prononcée

Peu prononcée

Pas prononcée

Indifférent



PUBICATIONS

RESUME

L'économie de la Côte d'Ivoire depuis plusieurs années, est basée sur l'agriculture. Pour maintenir sa position dans le monde, l'utilisation des intrants se verra associer à l'agriculture. Cependant, la chute des coûts des matières premières associée à la pauvreté grandissante dans le monde paysan, rend difficile l'accessibilité et l'utilisation de ces intrants proposés sur le marché. Il est donc important de proposer un fertilisant de qualité, pouvant remplacer le NPK, contribuant de manière efficace à la sécurité alimentaire, à la protection de l'environnement et capable d'être produit par le monde agricole. Cette étude vise à cultiver *Azolla sp* avec du filtrat de bouse de vache et de fiente de poulet et d'évaluer son effet fertilisant sur le développement, la croissance et la qualité nutritionnelle de la tomate, en comparaison avec le compost et le NPK. La méthodologie utilisée a consisté tout d'abord, en la production et la caractérisation physico-chimique des fougères *Azolla filiculoides* et *Azolla caroliniana*. Ensuite, la fougère *Azolla caroliniana* et le compost ont été utilisés pour fertiliser les plants de tomate depuis la pépinière jusqu'au champ afin d'évaluer les paramètres agronomiques de la tomate. Enfin, une analyse physico-chimique et un test organoleptique des fruits de tomate ont été réalisés pour l'appréciation de la qualité. Au terme de cette étude, il ressort que le filtrat de la fiente de poulet permet d'augmenter plus la production de la fougère *Azolla sp* surtout *A. caroliniana*, par rapport au filtrat de la bouse de vache. De 100 g ensemencés avec cette fiente, 7408,03 g de *Azolla caroliniana* sont récoltés au bout de 29 jours. Ce filtrat contient les éléments nutritifs primaires (NO_3^- (34 mg/L), NH_4^+ (5,9 mg/L), PO_4^{3-} (265 mg/L) et 1227,22 mg/L de K), les éléments nutritifs secondaires (47,57 mg/L de Ca, 28,35 mg/L de Mg, 218,36 mg/L de Na et 720,10 mg/L de SO_4^{2-}) et les oligo-éléments (0,56 mg/L de Cu, 11,69 mg/L de Fe et 1,18 mg/L de Mn). Les résultats obtenus à partir de l'utilisation des biofertilisants (*Azolla caroliniana* et compost de sciure de bois), montrent également que ces fertilisants ont significativement plus augmenté la productivité des plants de tomate par rapport aux deux témoins (NPK et témoin sans amendement). Aussi, le filtrat de *A. caroliniana* a le plus augmenté la hauteur (145,72 cm), le diamètre au collet (1,50 cm), le nombre de fruits (51,33 par plants) et même le rendement (44,23 t/ha) des plants de la tomate Boomerang F1 par rapport au compost, au NPK et au témoin (couche arable). Le biofertilisant *Azolla sp*, a aussi influencé significativement la teneur en vitamine C et en lycopène des fruits de tomate par rapport au compost, au NPK et au témoin sans amendement. Dans l'ensemble, les biofertilisants ont contribué à améliorer les fruits de tomate. Ainsi, *Azolla sp* pourrait constituer une alternative efficace à l'amélioration de la production agricole.

Mots-clés : *Azolla filiculoides* - *Azolla caroliniana* - Fougère - Filtrat - fiente de poulet - organoleptiques - Côte d'Ivoire

ABSTRACT

The economy of Côte d'Ivoire for several years has been based on agriculture. To maintain its position in the world, the use of inputs will be associated with agriculture. However, the fall in the cost of raw materials associated with growing poverty in the farming world, makes it difficult to access and use these inputs offered on the market. It is therefore important to offer a quality fertilizer that can replace NPK, that contributes effectively to food security and environmental protection and that can be produced by the farming community. This study aims to cultivate *Azolla sp* with cow dung and chicken manure filtrate and to evaluate its fertilizing effect on the development, growth and nutritional quality of tomatoes, compared to compost and NPK. The methodology used consisted first of all in the production and physico-chemical characterization of *Azolla filiculoides* and *Azolla caroliniana* ferns. Then, the *Azolla caroliniana* fern and the compost were used to fertilize tomato plants from the nursery to the field in order to evaluate the agronomic parameters of the tomato. Finally, a physico-chemical analysis and an organoleptic test of the tomato fruits were carried out for quality assessment. At the end of this study, it was found that chicken manure filtrate allowed a greater increase in the production of *Azolla sp* fern, especially *A. caroliniana*, compared to cow dung filtrate. From 100 g sown with this manure, 7408.03 g of *Azolla caroliniana* are harvested after 29 days. This filtrate contains primary nutrients (NO_3^- (34 mg/L), NH_4^+ (5.9 mg/L), PO_4^{3-} (265 mg/L) and 1227.22 mg/L K), secondary nutrients (47.57 mg/L Ca, 28.35 mg/L Mg, 218.36 mg/L Na and 720.10 mg/L SO_4^{2-}) and trace elements (0.56 mg/L Cu, 11.69 mg/L Fe and 1.18 mg/L Mn). The results obtained from the use of biofertilizers (*Azolla caroliniana* and sawdust compost), also show that these fertilizers significantly increased the productivity of tomato plants compared to the two controls (NPK and unamended control). Also, *A. caroliniana* filtrate increased the height (145.72 cm), diameter at the crown (1.50 cm), number of fruits (51.33 per plant) and even yield (44.23 t/ha) of Boomerang F1 tomato plants the most compared to the compost, NPK and control (topsoil). The biofertilizer *Azolla sp*, also significantly influenced the vitamin C and lycopene content of tomato fruits compared to the compost, NPK and unamended control. Overall, the biofertilizers contributed to tomato fruit improvement. Thus, *Azolla sp* could be an effective alternative for improving crop production.

Keywords : *Azolla filiculoides* - *Azolla caroliniana* - Fern - Filtrate - Chicken droppings - organoleptics - Côte d'Ivoire