

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTÉ DES SCIENCES
FACULTY OF SCIENCE

**CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES DE LA
VIE, SANTE ET ENVIRONNEMENT**
*CENTRE FOR RESEARCH AND TRAINING IN GRADUATE STUDIES IN LIFE SCIENCE,
HEALTH & ENVIRONMENTAL SCIENCES*

DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES
DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

**Biodiversité et potentiel bioprotecteur des champignons mycorhiziens à
arbuscules (CMA) sur le développement de la rouille asiatique due à
Phakopsora pachyrhizi dans la production du soja (*Glycine max* L.).**

**Thèse présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat/Ph.D en Biologie des
Organismes Végétaux**

Option : Biotechnologies Végétales

Par :

GBAPORO GBAPORO Fabrice Christian
Matricule : 10S0360
Master ès Sciences

Sous la direction de :
AMBANG Zachée
Professeur

Année : 2022





DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES

DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

ATTESTATION DE CORRECTION

.....

Nous Soussignés, membres du jury de soutenance de la thèse de Doctorat/Ph.D en Biologie des Organismes Végétaux Option Biotechnologies Végétales de l'étudiant **GBAPORO GBAPORO FABRICE CHRISTIAN**, Matricule 10S0360, soutenue publiquement le 14 décembre 2022 sur le sujet « **Biodiversité et potentiel bioprotecteur des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) sur le développement de la rouille asiatique due à *Phakopsora pachyrhizi* dans la production du soja (*Glycine max* L.)** » attestons que les corrections conformément aux remarques et recommandations du jury lors de la soutenance de la dite thèse de Doctorat/Ph.D ont été effectuées par le candidat

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit. /-

Président

Pr Joseph Martin
BELL


Rapporteur

Pr. AMBANG

Membres

M. Eddy L. M. M. M.

LISTE PROTOCOLAIRE

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I Faculté des Sciences Division de la Programmation et du Suivi des Activités Académiques		THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I Faculty of Science Division of Programming and Follow-up of Academic Affairs
LISTE DES ENSEIGNANTS PERMANENTS	LIST OF PERMANENT TEACHING STAFF	

ANNÉE ACADEMIQUE 2022/2023

(Par Département et par Grade)

DATE D'ACTUALISATION 09 novembre 2022

ADMINISTRATION

DOYEN : TCHOUANKEU Jean- Claude, *Maître de Conférences*

VICE-DOYEN / DPSAA: ATCHADE Alex de Théodore, *Maître de Conférences*

VICE-DOYEN / DSSE : NYEGUE Maximilienne Ascension, *Professeur*

VICE-DOYEN / DRC : ABOSSOLO ANGUE Monique, *Maître de Conférences*

Chef Division Administrative et Financière : NDOYE FOE Florentine Marie Chantal, *Maître de Conférences*

Chef Division des Affaires Académiques, de la Recherche et de la Scolarité DAARS : AJEAGAH Gideon AGHAINDUM, *Professeur*

1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (39)			
N°	NOMS ET PRÉNOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1	BIGOGA DAIGA Jude	Professeur	En poste
2	BOUDJEKO Thaddée	Professeur	En poste
3	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
4	FOKOU Elie	Professeur	En poste
5	KANSCI Germain	Professeur	En poste
6	MBACHAM FON Wilfried	Professeur	En poste
7	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	Chef de Département
8	OBEN Julius ENYONG	Professeur	En poste
9	ACHU Merci BIH	Maître de Conférences	En poste
10	ATOGHO Barbara Mma	Maître de Conférences	En poste
11	AZANTSA KINGUE GABIN BORIS	Maître de Conférences	En poste

12	BELINGA née NDOYE FOE F. M. C.	Maître de Conférences	Chef DAF / FS
13	DJUIDJE NGOUNOUE Marcelline	Maître de Conférences	En poste
14	EFFA ONOMO Pierre	Maître de Conférences	Vice-Doyen / DRC /UEbwa
15	EWANE Cécile Anne	Maître de Conférences	En poste
16	KOTUE TAPTUE Charles	Maître de Conférences	En poste
17	MOFOR née TEUGWA Clotilde	Maître de Conférences	Inspecteur de Service MINESUP
18	NANA Louise épouse WAKAM	Maître de Conférences	En poste
19	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
20	NGUEFACK Julienne	Maître de Conférences	En poste
21	NJAYOU Frédéric Nico	Maître de Conférences	En poste
22	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Maître de Conférences	En poste
23	AKINDEH MBUH NJI	Chargé de Cours	En poste
24	BEBEE Fadimatou	Chargée de Cours	En poste
25	BEBOY EDJENGUELE Sara Nathalie	Chargé de Cours	En poste
26	DAKOLE DABOY Charles	Chargé de Cours	En poste
27	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Chargée de Cours	En poste
28	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Chargé de Cours	En poste
29	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
30	KOTUE KAPTUE Charles	Chargé de Cours	En poste
31	LUNGA Paul KEILAH	Chargé de Cours	En poste
32	MANANGA Marlyse Joséphine	Chargée de Cours	En poste
33	MBONG ANGIE M. Mary Anne	Chargée de Cours	En poste
34	OWONA AYISSI Vincent Brice	Chargé de Cours	En poste
35	Palmer MASUMBE NETONGO	Chargé de Cours	En poste
36	PECHANGOU NSANGOU Sylvain	Chargé de Cours	En poste
37	WILFRIED ANGIE Abia	Chargé de Cours	En poste
38	FOUPOUPOUOGNIGNI Yacouba	Assistant	En poste
39	MBOUCHE FANMOE Marceline Joëlle	Assistante	En poste
2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (51)			
1	AJEAGAH Gideon AGHAINDUM	Professeur	DAARS/FS
2	BILONG BILONG Charles-Félix	Professeur	Chef de Département
3	DIMO Théophile	Professeur	En Poste

4	DJIETO LORDON Champlain	Professeur	En Poste
5	DZEUFJET DJOMENI Paul Désiré	Professeur	En Poste
6	ESSOMBA née NTSAMA MBALA	Professeur	Vice Doyen/FMSB/UYI
7	FOMENA Abraham	Professeur	En Poste
8	KEKEUNOU Sévilor	Professeur	En poste
9	NJAMEN Dieudonné	Professeur	En poste
10	NJIOKOU Flobert	Professeur	En Poste
11	NOLA Moïse	Professeur	En poste
12	TAN Paul VERNYUY	Professeur	En poste
13	TCHUEM TCHUENTE Louis Albert	Professeur	Inspecteur de service Coord.Progr./MINSANTE
14	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Professeur	En poste
15	ALENE Désirée Chantal	Maître de Conférences	Vice-Doyen / DSSE /UEbwa
16	BILANDA Danielle Claude	Maître de Conférences	En poste
17	DJIOGUE Séfirin	Maître de Conférences	En poste
18	JATSA BOUKENG Hermine épouse MEGAPTCHE	Maître de Conférences	En Poste
19	LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.	Maître de Conférences	En poste
20	MBENOUN MASSE Paul Serge	Maître de Conférences	En poste
21	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
22	MONY Ruth Epse NTONE	Maître de Conférences	En Poste
23	NGUEGUIM TSOFAK Florence	Maître de Conférences	En poste
24	NGUEMBOCK	Maître de Conférences	En poste
25	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste
26	ATSAMO Albert Donatien	Chargé de Cours	En poste
27	BASSOCK BAYIHA Etienne Didier	Chargé de Cours	En poste
28	DONFACK Mireille	Chargée de Cours	En poste
29	ESSAMA MBIDA Désirée Sandrine	Chargée de Cours	En poste
30	ETEME ENAMA Serge	Chargé de Cours	En poste
31	FEUGANG YOUMSSI François	Chargé de Cours	En poste
32	GONWOUO NONO Legrand	Chargé de Cours	En poste
33	GOUNOUE KAMKUMO Raceline	Chargée de Cours	En poste
34	KANDEDA KAVAYE Antoine	Chargé de Cours	En poste
35	KOGA MANG DOBARA	Chargé de Cours	En poste

36	LEME BANOCK Lucie	Chargée de Cours	En poste
37	MAHOB Raymond Joseph	Chargé de Cours	En poste
38	METCHI DONFACK Mireille Flaure Epse GHOUMO	Chargé de Cours	En poste
39	MOUNGANG Luciane Marlyse	Chargée de Cours	En poste
40	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Chargé de Cours	En poste
41	NGOUATEU KENFACK Omer Bébé	Chargé de Cours	En poste
42	NJUA Clarisse Yafi	Chargée de Cours	Chef Div. Uté Bamenda
43	NOAH EWOTI Olive Vivien	Chargée de Cours	En poste
44	TADU Zephyrin	Chargé de Cours	En poste
45	TAMSA ARFAO Antoine	Chargé de Cours	En poste
46	YEDE	Chargé de Cours	En poste
47	YOUNOUSSA LAME	Chargé de Cours	En poste
48	AMBADA NDZENGUE Georgia Elna	Assistante	En poste
49	FOKAM Alvine Christelle Epse KEGNE	Assistante	En poste
50	MAPON NSANGO Indou	Assistant	En poste
51	NWANE Philippe Bienvenu	Assistant	En poste
3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (33)			
1	AMBANG Zachée	Professeur	Chef de Département
2	DJOCGOUE Pierre François	Professeur	Chef de Centre Biotechnologie de l'UY1 à Nkolbisson
3	MBOLO Marie	Professeur	En poste
4	MOSSEBO Dominique Claude	Professeur	En poste
5	YOUMBI Emmanuel	Professeur	En poste
6	ZAPFACK Louis	Professeur	En poste
7	ANGONI Hyacinthe	Maître de Conférences	En poste
8	BIYE Elvire Hortense	Maître de Conférences	En poste
9	MALA Armand William	Maître de Conférences	En poste
10	MBARGA BINDZI Marie Alain	Maître de Conférences	DAAC/ UDla
11	NDONGO BEKOLO	Maître de Conférences	CE MINRESI
12	NGODO MELINGUI Jean Baptiste	Maître de Conférences	En poste
13	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.	Maître de Conférences	CT MINRESI
14	ONANA JEAN MICHEL	Maître de Conférences	En poste

15	TONFACK Libert Brice	Maître de Conférences	En poste
16	TSOATA Esaïe	Maître de Conférences	En poste
17	DJEUANI Astride Carole	Chargée de Cours	En poste
18	GOMANDJE Christelle	Chargée de Cours	En poste
19	GODSWILL NTSOMBAH NTSEFONG	Chargé de Cours	En poste
20	KABELONG BANAHOU Louis-Paul- Roger	Chargé de Cours	En poste
21	KONO Léon Dieudonné	Chargé de Cours	En poste
22	LIBALAH Moses BAKONCK	Chargé de Cours	En poste
23	LIKENG-LI-NGUE Benoit C.	Chargé de Cours	En poste
24	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Chargée de Cours	En poste
25	MAHBOU SOMO TOUKAM Gabriel	Chargé de Cours	En poste
26	NGALLE Hermine BILLE	Chargée de Cours	En poste
27	NGOUO Lucas Vincent	Chargé de Cours	En poste
28	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Chargée de Cours	En poste
29	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Chargée de Cours	En poste
30	NSOM ZAMBO Epse PIAL Annie Claude	Chargée de Cours	En détachement/UNESCO MALI
31	TAEDOUNG Evariste Hermann	Chargé de Cours	En poste
32	TEMEGNE NONO Carine	Chargée de Cours	En poste
33	MANGA NDJAGA Jude	Assistant	En poste

4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (31)

1	Florence UFI CHINJE Epse MELO	Professeur	Recteur Univ. Ngaoundere
3	GHOGOMU Paul MINGO	Professeur	Ministre Chargé de Miss. PR
4	NANSEU NJIKI Charles Péguy	Professeur	En poste
5	NDIFON Peter TEKE	Professeur	CT MINRESI
6	NDIKONTAR Maurice KOR	Professeur	Vice-Doyen Univ. Bamenda
7	NENWA Justin	Professeur	En poste
8	NGAMENI Emmanuel	Professeur	DOYEN FS Univ. Ngaoundere
9	NGOMO Horace MANGA	Professeur	Vice Chancellor/UB
10	ACAYANKA Elie	Maître de Conférences	En poste
11	EMADACK Alphonse	Maître de Conférences	En poste
12	KAMGANG YOUBI Georges	Maître de Conférences	En poste

13	KEMMEGNE MBOUGUEM Jean C.	Maître de Conférences	En poste
14	KENNE DEDZO Gustave	Maître de Conférences	En poste
15	KONG SAKEO	Maître de Conférences	En poste
16	MBEY Jean Aime	Maître de Conférences	En poste
17	NDI Julius NSAMI	Maître de Conférences	Chef de Département
18	NEBAH Née NDOSIRI Bridget NDOYE	Maître de Conférences	CT MINPROFF
19	NJIOMOU C. épouse DJANGANG	Maître de Conférences	En poste
20	NJOYA Dayirou	Maître de Conférences	En poste
21	NYAMEN Linda Dyorisse	Maître de Conférences	En poste
22	PABOUDAM GBAMBIE AWAWOU	Maître de Conférences	En poste
23	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Maître de Conférences	En poste
24	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Chargé de Cours	Chef Service/ ENS Bertoua
25	CHEUMANI YONA Arnaud M.	Chargé de Cours	En poste
26	KOUOTOU DAOUDA	Chargé de Cours	En poste
27	MAKON Thomas Beauregard	Chargé de Cours	En poste
28	NCHIMI NONO KATIA	Chargé de Cours	En poste
29	NJANKWA NJABONG N. Eric	Chargé de Cours	En poste
30	PATOUOSSA ISSOFA	Chargé de Cours	En poste
31	SIEWE Jean Mermoz	Chargé de Cours	En poste
32	SIEWE Jean Mermoz	Chargé de Cours	En Poste

5- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (38)

1	DONGO Etienne	Professeur	Vice-Doyen/FSE/UYI
2	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	Chef de Département UDS
3	NYASSE Barthélemy	Professeur	En poste
4	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	Directeur/ MINESUP/ Chef de Département
5	WANDJI Jean	Professeur	En poste
6	MBAZOA Née DJAMA Céline	Professeur	En poste
7	Alex de Théodore ATCHADE	Maître de Conférences	Vice-Doyen / DPSAA
8	AMBASSA Pantaléon	Maître de Conférences	En poste
9	EYONG Kenneth OBEN	Maître de Conférences	En poste
10	FOLEFOC Gabriel NGOSONG	Maître de Conférences	En poste
11	FOTSO WABO Ghislain	Maître de Conférences	En poste

12	KAMTO Eutrophe Le Doux	Maître de Conférences	En poste
13	KENMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
14	KEUMEDJIO Félix	Maître de Conférences	En poste
15	KOUAM Jacques	Maître de Conférences	En poste
16	MKOUNGA Pierre	Maître de Conférences	En poste
17	MVOT AKAK CARINE	Maître de Conférences	En poste
18	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	Sous/Direct. MINERESI
19	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Maître de Conférences	C.E/ MINESUP
20	NOTE LOUGBOT Olivier Placide	Maître de Conférences	C.S/ MINESUP
21	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
22	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
23	TAGATSING FOTSING Maurice	Maître de Conférences	En poste
24	TCHOUANKEU Jean-Claude	Maître de Conférences	Doyen /FS/ UYI
25	YANKEP Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
26	ZONDEGOUMBA Ernestine	Maître de Conférences	En poste
27	NGNINTEDO Dominique	Chargé de Cours	En poste
28	NGOMO Orléans	Chargée de Cours	En poste
29	OUAHOUE WACHE Blandine M.	Chargée de Cours	En poste
30	SIELINOU TEDJON Valérie	Chargé de Cours	En poste
31	MESSI Angéline Nicolas	Chargé de Cours	En poste
32	TCHAMGOUE Joseph	Chargé de Cours	En poste
33	TSAMO TONTSA Armelle	Chargé de Cours	En poste
34	TSEMEUGNE Joseph	Chargé de Cours	En poste
35	MUNVERA MFIFEN Aristide	Assistant	En poste
36	NONO NONO Éric Carly	Assistante	En poste
37	OUETE NANTCHOUANG Judith Laure	Assistant	En poste
38	TSAFFACK Maurice	Assistant	En poste

6- DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (22)

1	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	Chef Div. MINESUP
2	FOUDA NDJODO Marcel Laurent	Professeur	Chef Dpt ENS/Chef IGA. MINESUP
3	NDOUNDAM René	Maître de Conférences	En poste
4	TSOPZE Norbert	Maître de Conférences	En poste

5	ABESSOLO ALO'O Gislain	Chargé de Cours	Sous-Directeur/MINFOPRA
6	AMINOU Halidou	Chargé de Cours	Chef de Département
7	DJAM Xaviera YOUH - KIMBI	Chargé de Cours	En Poste
8	DOMGA KOMGUEM Rodrigue	Chargé de Cours	En poste
9	EBELE Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
10	HAMZA Adamou	Chargé de Cours	En poste
11	JIOMEKONG AZANZI Fidel	Chargé de Cours	En poste
12	KOUOKAM KOUOKAM E. A.	Chargé de Cours	En poste
13	MELATAGIA YONTA Paulin	Chargé de Cours	En poste
14	MONTHÉ DJIADEU Valéry M.	Chargé de Cours	En poste
15	OLE OLE Daniel Claude Delort	Chargé de Cours	Directeur adjoint ENSET Ebolowa
16	TAPAMO Hyppolite	Chargé de Cours	En poste
17	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste
18	EKODECK Stéphane Gaël Raymond	Assistant	En poste
19	MAKEMBE. S. Oswald	Assistant	En poste
20	MESSI NGUELE Thomas	Assistant	En poste
21	NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.	Assistant	En poste
22	NZEKON NZKO'O Armel Jacques	Assistant	En poste

7- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (30)

1	AYISSI Raoult Domingo	Professeur	Chef de Département
2	KIANPI Maurice	Maître de Conférences	En poste
3	MBANG Joseph	Maître de Conférences	En poste
4	MBEHOU Mohamed	Maître de Conférences	En poste
5	MBELE BIDIMA Martin Ledoux	Maître de Conférences	En poste
6	NOUNDJEU Pierre	Maître de Conférences	Chef service des programmes & Diplômes/FS/UIYI
7	TAKAM SOH Patrice	Maître de Conférences	En poste
8	TCHAPNDA NJABO Sophonie B.	Maître de Conférences	Directeur/AIMS Rwanda
9	TCHOUNDJA Edgar Landry	Maître de Conférences	En poste
10	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	Chef Cellule MINPLAMAT
11	BOGSO ANTOINE MARIE	Chargé de Cours	En poste
12	CHENDJOU Gilbert	Chargé de Cours	En poste
13	DJIADEU NGAHA Michel	Chargé de Cours	En poste

14	DOUANLA YONTA Herman	Chargé de Cours	En poste
15	KIKI Maxime Armand	Chargé de Cours	En poste
16	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
17	MENGUE MENGUE David Joe	Chargé de Cours	Chef Dpt/ENS Uté Maroua
18	NGUEFACK Bernard	Chargé de Cours	En poste
19	NIMPA PEFOUKEU Romain	Chargée de Cours	En poste
20	OGADOA AMASSA YOGA	Chargé de Cours	En poste
21	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
22	TCHEUTIA Daniel Duviol	Chargé de Cours	En poste
23	TETSADJIO TCHILEPECK M. E.	Chargé de Cours	En poste
24	BITYE MVONDO Esther Claudine	Assistante	En poste
25	FOKAM Jean Marcel	Assistant	En poste
26	LOUMNGAM KAMGA Victor	Assistant	En poste
27	MBATAKOU Salomon Joseph	Assistant	En poste
28	MBIAKOP Hilaire George	Assistant	En poste
29	MEFENZA NOUNTU Thiery	Assistant	En poste
30	TENKEU JEUFACK Yannick Léa	Assistant	En poste

8- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (22)

1	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	Chef de Département
2	NYEGUE Maximilienne Ascension	Professeur	VICE-DOYEN / DSSE
3	NWAGA Dieudonné M.	Professeur	En poste
4	ASSAM ASSAM Jean Paul	Maître de Conférences	En poste
5	BOUGNOM Blaise Pascal	Maître de Conférences	En poste
6	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste
7	KOUITCHEU MABEKU Epse KOUAM Laure Brigitte	Maître de Conférences	En poste
8	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
9	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Maître de Conférences	En poste
10	BODA Maurice	Chargé de Cours	En position d'absence irrégulière
11	ESSONO OBOUGOU Germain G.	Chargé de Cours	En poste
12	NJIKI BIKOÏ Jacky	Chargée de Cours	En poste
13	TCHIKOUA Roger	Chargé de Cours	Chef service la scolarité et des statistiques / /FS/UYI
14	ESSONO Damien Marie	Chargé de Cours	En poste

15	LAMYE Glory MOH	Chargé de Cours	En poste
16	MEYIN A EBONG Solange	Chargée de Cours	En poste
17	NKOUDOU ZE Nardis	Chargé de Cours	En poste
18	TAMATCHO KWEYANG Blandine Pulchérie	Chargée de Cours	En poste
19	TOBOLBAÏ Richard	Chargé de Cours	En poste
20	MONI NDEDI Esther Del Florence	Assistante	En poste
21	NKOUÉ TONG ABRAHAM	Assistant	En poste
22	SAKE NGANE Carole Stéphanie	Assistante	En poste
9- DEPARTEMENT DE PYSIQUE (PHY) (43)			
1	BEN-BOLIE Germain Hubert	Professeur	En poste
2	DJUIDJE KENMOE épouse ALOYEM	Professeur	En poste
3	EKOBENA FOU DA Henri Paul	Professeur	Vice-Recteur Uté Ngaoundéré
4	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
5	NANA ENGO Serge Guy	Professeur	En poste
6	NANA NBENDJO Blaise	Professeur	En poste
7	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	Chef de Département
8	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Professeur	En poste
9	NOUAYOU Robert	Professeur	En poste
10	PEMHA Elkana	Professeur	En poste
11	SAIDOU	Professeur	Chef de centre/IRGM/MINRESI
12	TABOD Charles TABOD	Professeur	Doyen FS Univ/Bda
13	TCHAWOUA Clément	Professeur	En poste
14	WOAFO Paul	Professeur	En poste
15	ZEKENG Serge Sylvain	Professeur	En poste
16	BIYA MOTTO Frédéric	Maître de Conférences	DG/HYDRO Mekin
17	BODO Bertrand	Maître de Conférences	En poste
18	ENYEGUE A NYAM épouse BELINGA	Maître de Conférences	En poste
19	EYEBE FOU DA Jean sire	Maître de Conférences	En poste
20	FEWO Serge Ibraïd	Maître de Conférences	En poste
21	HONA Jacques	Maître de Conférences	En poste
22	MBINACK Clément	Maître de Conférences	En poste
23	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Maître de Conférences	En poste

24	NDOP Joseph	Maître de Conférences	En poste
25	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
26	SIMO Elie	Maître de Conférences	En poste
27	VONDOU Derbetini Appolinaire	Maître de Conférences	En poste
28	WAKATA née BEYA Annie	Maître de Conférences	Directeur/ENS/UIYI
29	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En poste
30	AYISSI EYEBE Guy François Valérie	Chargé de Cours	En poste
31	CHAMANI Roméo	Chargé de Cours	En poste
32	DJIOTANG TCHOTCHOU Lucie Angennes	Chargée de Cours	En poste
33	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste
34	FOUEDJIO David	Chargé de Cours	Chef Cell. MINADER
35	MELI'I Joelle Larissa	Chargée de Cours	En poste
36	MVOGO ALAIN	Chargé de Cours	En poste
37	OTTOU ABE Martin Thierry	Chargé de Cours	En poste
38	TEYOU NGOUPOU Ariel	Chargé de Cours	En poste
39	WOULACHE Rosalie Laure	Chargée de Cours	Absente depuis janvier 2022
40	KAMENI NEMATCHOUA Modeste	Assistant	En poste
41	LAMARA Maurice	Assistant	En poste
42	NGA ONGODO Dieudonné	Assistant	En poste
43	WANDJI NYAMSI William	Assistant	En poste
10- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (42)			
1	BITOM Dieudonné	Professeur	Doyen / FASA / UDs
2	FOUATEU Rose épouse YONGUE	Professeur	En poste
3	NDAM NGOUPAYOU Jules-Remy	Professeur	En poste
4	NDJIGUI Paul Désiré	Professeur	Chef de Département
5	NGOS III Simon	Professeur	En poste
6	NKOUMBOU Charles	Professeur	En poste
7	NZENTI Jean-Paul	Professeur	En poste
8	ABOSSOLO née ANGUE Monique	Maître de Conférences	Vice-Doyen / DRC
9	BISSO Dieudonné	Maître de Conférences	Directeur/Projet Barrage Memve'ele
10	EKOMANE Emile	Maître de Conférences	En poste
11	FUH Calistus Gentry	Maître de Conférences	Sec. D'Etat/MINMIDT

12	GANNO Sylvestre	Maître de Conférences	En poste
13	GHOGOMU Richard TANWI	Maître de Conférences	Chef de Département/Uté Maroua
14	MOUNDI Amidou	Maître de Conférences	CT/ MINIMDT
15	NGO BIDJECK Louise Marie	Maître de Conférences	En poste
16	NGUEUTCHOUA Gabriel	Maître de Conférences	CEA/MINRESI
17	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
18	NYECK Bruno	Maître de Conférences	En poste
19	ONANA Vincent Laurent	Maître de Conférences	Chef de Département /UEbwa
20	TCHAKOUNTE J. épse NOUMBEM	Maître de Conférences	Chef. cell / MINRESI
21	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
22	TEMGA Jean Pierre	Maître de Conférences	En poste
23	YENE ATANGANA Joseph Q.	Maître de Conférences	Chef Div. /MINTP
24	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	DG/ART
25	ANABA ONANA Achille Basile	Chargé de Cours	En poste
26	BEKOA Etienne	Chargé de Cours	En poste
27	ELISE SABABA	Chargé de Cours	En poste
28	ESSONO Jean	Chargé de Cours	En poste
29	EYONG JOHN TAKEM	Chargé de Cours	En poste
30	MAMDEM TAMTO LIONELLE ESTELLE	Chargé de Cours	En poste
31	MBESSE CECILE OLIVE	Chargée de Cours	En poste
32	MBIDA YEM	Chargé de Cours	En poste
33	METANG Victor	Chargé de Cours	En poste
34	MINYEM Dieudonné-Lucien	Chargé de Cours	CD/Uma
35	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargée de Cours	En poste
36	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
37	NTSAMA ATANGANA Jacqueline	Chargé de Cours	En poste
38	TCHAPCHET TCHATO De P.	Chargé de Cours	En poste
39	TEHNA Nathanaël	Chargé de Cours	En poste
40	FEUMBA Roger	Chargé de Cours	En poste
41	MBANGA NYOBE Jules	Chargé de Cours	En poste
42	NGO'O ZE Arnaud	Assistant	En poste

Répartition chiffrée des Enseignants de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I

NOMBRE D'ENSEIGNANTS					
DÉPARTEMENT	Professeurs	Maîtres de Conférences	Chargés de Cours	Assistants	Total
BCH	8 (00)	14 (10)	15 (05)	02 (01)	39 (16)
BPA	14 (01)	11 (07)	22 (07)	04 (02)	51 (17)
BPV	06 (01)	10 (01)	16 (09)	01 (00)	33 (11)
CI	08 (01)	14 (04)	08 (01)	00 (0)	31 (06)
CO	06 (01)	20 (04)	08 (03)	04 (01)	38 (09)
IN	02 (00)	02 (00)	12 (01)	06 (00)	22 (01)
MAT	01 (00)	08 (00)	14 (01)	07 (01)	30 (02)
MIB	03 (01)	06 (02)	10 (03)	03 (02)	22 (08)
PHY	15 (01)	13 (02)	11 (03)	04 (00)	43 (06)
ST	07 (01)	16 (03)	18 (04)	01 (00)	42 (08)
Total	71 (07)	114 (33)	134 (37)	32 (07)	351 (84)
Soit un total de			351 (84) dont :		
Professeurs			70 (07)		
Maîtres de Conférences			114 (33)		
Chargés de Cours			134 (37)		
Assistants			32 (07)		
() = Nombre de Femmes			84		

DEDICACE

A

La famille GBAPORO

REMERCIEMENTS

Je remercie l'Université de Yaoundé I, et l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement pour avoir permis la réalisation de ce travail. Je tiens également à remercier particulièrement :

- Pr. AMBANG Zachée, Chef de Département de Biologie et Physiologie Végétales (DBPV), mon directeur de thèse, qui a accepté de m'accueillir dans son laboratoire de recherche. Vos conseils et encouragements ont été d'une importance capitale ;
- tous les enseignants du Département de Biologie et Physiologie Végétales de l'UYI pour la formation qu'ils m'ont apportée depuis le niveau I et leurs multiples conseils et encouragements ;
- Pr. BOUDJEKO Thaddée du Département de Biochimie de l'Université de Yaoundé I qui a accepté de m'accueillir dans son laboratoire de recherche. Vos conseils et encouragements ont été d'une importance capitale ;
- Pr NGONKEU MAGAPCHE Eddy Léonard pour sa collaboration, conseils et encouragements dans la réalisation de ce travail
- Pr. MBA Gabriel Chef de Département de langue à l'Ecole Normale de l'Université de Yaoundé I pour ses encouragements, son soutien multiforme ;
- l'Honorable NKOUINCHE Albert promoteur du programme PAD (Programme d'aide aux doctorants), pour son assistance financière;
- toute l'équipe du laboratoire de la phytoprotection et de la valorisation des ressources des plantes pour leur assistance dans les dosages des composés biochimiques ;
- toute l'équipe du laboratoire de Phytopathologie particulièrement, Dr. NGOOH NDOH, Dr. MBOUSSI Serge, Dr. KONE Nsangou, Dr. HEU Alain Dr. NDOGHO Angèle, Dr. NGANTI Dorothé Dr. KUATE William, Dr. NGATSI Patrice, Dr Dida Lonsti sylvère Landry, Dr ESSOME Sale Charles, M Dongmo Landry, Mme MBEGA SANAMA Nathalie et Mme NGATA NGADJUI Laurence pour l'assistance dans les manipulations et à la correction du présent manuscrit ;
- tout le personnel et les stagiaires du laboratoire de microbiologie de l'IRAD. Je pense ainsi au Dr. BEGOUDE Didier qui a accepté de m'accueillir dans ce laboratoire ;
- tous mes camarades de promotion sans exception parmi lesquels : Kemmogne Popice, Tchadjoko Rodrigue, Robert Tchuigoua, AMBOMBO OGUENE Marien ; CHIMI Pierre Marie, NYOUMA Achille, TSIGAIN TSIGAIN Fabrice pour leurs aides multiformes et leurs critiques constructives ;
- mes parents GBAPORO MBANTOUA Jean Paul et TOUOMCHE Pauline, pour leur assistance en champ qui a été capitale, pour leurs affections, leurs encouragements, leurs soutiens divers, et multiples conseils ;

-mes frères et sœurs : Bessemou Lea Béatrice, Mafo Prisca, Happy Annie, Mbantoua Serge, Choupe Yves, Fotso Narcisse, Ingride Carole, pour leurs soutiens multiformes et leurs encouragements ;

- M NGOUMBA DOKO Christian mon beau frère pour ses encouragements et conseils ;

- Ma fiancée DJOUEGO CATCHUM ADELIN PRESCALE, mes enfants TATCHUM GBAPORO DANIEL, GBAPORO TOUOMCHE MERVEILLE ARCANGE, ma belle sœur DJUIDJE TATCHUM PATRICIA pour leurs encouragements, affections et assistances

- tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur soutien et leur collaboration à la réalisation de ce travail et donc les noms ne sont pas cités ici, qu'ils trouvent à travers cette Thèse, le témoignage de ma profonde gratitude.

SOMMAIRE

LISTE PROTOCOLAIRE	i
DEDICACE.....	xiv
REMERCIEMENTS.....	xv
SOMMAIRE	xvii
LISTE DES FIGURES	xx
LISTE DES TABLEAUX.....	xxii
LISTE DES ABREVIATIONS	xxiv
RESUME	xxv
ABSTRACT	xxvii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE	5
I.1. Soja (<i>Glycine max</i>).....	5
I.1.1. Histoire et distribution	5
I.1.2. Classification et biologie.....	6
I.1.3. Caractères botaniques du soja	6
I.1.3.1. Appareil végétatif	7
I.1.3.2. Appareil reproducteur	7
I.1.3.3. Racines à nodosités	7
I.1.4. Conditions agro écologiques	8
I.1.5. Importance du soja.....	9
I.1.6. Ennemis du soja.....	10
I.1.6.1. Maladies du soja	10
I.2. Mécanismes de défense naturelle de la plante.....	14
I.3. Interaction entre isolat de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> / <i>Glycine max</i>	21
I.4. moyens de lutte contre la rouille asiatique du soja	23
I.4.1. Lutte culturale.....	23
I.4.2. Lutte chimique.....	23
I.4.3. Lutte génétique	23
I.4.4. Lutte biologique.....	24
I.5. GENERALITES SUR LES SYMBIOSES	24
I.5.1. Symbioses rhizobia-légumineuses	24
I.5.2. Symbioses mycorhizienne.....	29
I.5.2.1. Définition et caractéristiques	29

I.5.2.2. Classe et structure des champignons.....	29
I.5.2.3. Classification des champignons mycorhiziens à arbuscules.....	33
I.5.2.4. Importances des champignons mycorhiziens à arbuscule (CMA).....	36
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES	41
II.1. MATERIEL	41
II.1.1. Présentation des sites expérimentaux	41
II.1.2. Description des sites d'étude.....	41
II.1.3. Matériel végétal.....	42
II.1.4. Matériel fongique	44
II.1.5. Matériel phytosanitaire	44
II.1.6. Autre matériel.....	44
II.2. METHODES.....	44
II.2.1. Evaluation de la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules dans la rhizosphère des plants de soja.....	44
II.2.1.1. Echantillonnage du sol de la rhizosphère.....	44
II.2.1.3. Piégeage des mycorhizes à arbuscules du sol.....	45
II.2.1.4. Isolement, Caractérisation et Description morphologique des spores de CMA observées dans la rhizosphère du soja	46
II.2.1.5. Purification et Multiplication	47
II.2.1.6. Evaluation des indices de diversité des CMA	47
II.2.2. Caractérisation des isolats de <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	48
II.2.2.1. Collecte des échantillons et dénomination des isolats	48
II.2.2.2. Isolement et multiplication des isolats.....	49
II.2.2.3. Description des Morphologies et des Morphométries des urédospores obtenues de chaque isolat.....	50
II.2.2.4. Evaluation de l'agressivité des isolats de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> sur les feuilles détachées de soja... ..	50
II.2.3. Criblage de quelques variétés de soja pour leur résistance ou susceptibilité à <i>Phakopsora pachyrhizi</i> en champ.....	51
II.2.3.1. Dispositif expérimental et conditions de culture	51
II.2.3.2. Evaluation de l'incidence et de la sévérité de la rouille asiatique du soja	52
II.2.3.3. Estimation du rendement des variétés de soja	52
II.2.4. Evaluation de l'effet des isolats de CMA sur le développement de la rouille du soja en serre après inoculation artificielle et en champ après inoculation naturelle	53
II.2.4.1. Dispositifs expérimentaux.....	53
II.2.4.2. Semis, Inoculation des CMA et entretien	54
II.2.4.3. Evaluation des paramètres de croissances en fonction des traitements (CMA)	55

II.2.4.4. Evaluation de l'effet de CMA sur les paramètres de la maladie	55
II.2.4.5. Evaluation des paramètres de mycorhization sur le développement de la maladie	56
II.2.4.6. Evaluation de l'effet des CMA sur le rendement en serre et en champ	58
II.2.4.7. Evaluation de l'effet de la mycorhization sur la synthèse des composés biochimiques et l'activité enzymatique en serre et en champ	58
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION.....	64
III.1. RESULTATS.....	64
III.1.1. Diversité des CMA dans la rhizosphère des plantes de soja.....	64
III.1.1.1. Composition physico-chimique des sols des zones agro-écologiques (ZAE).....	64
III.1.1.2. Morphotypes des CMA isolés dans la rhizosphère des plantes de soja	65
III.1.1.3. Densité des CMA présent dans la rhizosphère du soja dans différentes zones agro-écologiques du Cameroun.....	65
III.1.1.4. Indices de diversités des champignons mychoriziens à arbuscules dans la rhizosphère du soja	69
III.1.1.5. Corrélation entre les paramètres chimiques, et le nombre moyen de spores dans les différentes zones	71
III.1.1.6. Typologie des zones agroécologiques basée sur les espèces de CMA	71
III.1.1.7. Fréquence de mycorhization racinaire du soja.....	72
III.1.1.8. Isolats de CMA choisis	72
III.1.2. Caractéristiques Phénotypiques des isolats de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> collectés	73
III.1.2.1. Agent pathogène isolé et nombres isolats collectés.....	73
III.1.2.2. Morphologies des urédospores issues des différents isolats de <i>Phakopsora.pachyrhizi</i>	73
III.1.2.3. Morphométries des urédospores de <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	74
III.1.2.4. Agressivité des isolats de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> sur les feuilles détachées de soja.....	76
III.1.3. Criblage de quelques variétés de soja pour leur résistance ou susceptibilité à <i>Phakopsora pachyrhizi</i> . 78	
III.1.4. Effet des souches de CMA sur le développement de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> en serre et en champ.....	83
III.1.4.1. Effet des souches de CMA sur le développement de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> en serre	83
III.1.4.2. Effet des souches de CMA sur le développement de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> en champ	116
III.2. DISCUSSION.....	140
CHAPITRE IV.CONCLUSION ET PERSPECTIVES	148
IV.1. Conclusion.....	148
IV.2. Perspectives	150
BIBLIOGRAPHIE.....	151
ANNEXES	172
PUBLICATIONS	185

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Plante de soja	8
Fig. 2. Symptômes de la rouille asiatique du soja	13
Fig. 3. Cycle de développement du pathogène	14
Fig. 4. Principaux mécanismes de défense des plantes	16
Fig. 5. Niveau d'expression des gènes codant pour des enzymes impliquées dans le métabolisme de l'arginine et de la proline	22
Fig. 6 . Différentes étapes de l'établissement de la symbiose rhizobia-légumineuse	25
Fig. 7. Types mycorhiziens sur une coupe transversale de racine	30
Fig. 8. Diversité morphologique des CMA des sols du Cameroun	32
Fig. 9. Structures composant les mycorhizes à arbuscules et à vésicules.	32
Fig. 10. Classification des champignons mycorhiziens à arbuscules.	34
Fig. 11. Cycle de développement des CMA.....	35
Fig. 12. Extension de la zone d'épuisement du phosphore autour des mycorhizes mycorhize.	37
Fig. 13. Effets positifs de la colonisation mycorhizienne arbusculaire (CMA).	40
Fig. 14. Localisation des sites d'étude	42
Fig. 15. Différentes étapes de piégeage	46
Fig. 16. Production en masse des spores	47
Fig. 17. Mesure de la longueur et de la largeur des urédospores au microscope optique	50
Fig. 18. Dispositif expérimentale de criblage variétal	51
Fig. 19. Dispositif expérimental en serre.	53
Fig. 20. Dispositif expérimental en champ.....	54
Fig. 21. Inoculation d'inoculum de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> en serre.	55
Fig. 22. Fragments racinaires montés entre lames et lamelles.	57
Fig. 23. Echelle d'évaluation de la colonisation racinaire	58
Fig. 24. Différentes spores de la rhizosphère du soja en fonction des couleurs.	66
Fig. 25. Différentes membranes des spores observées :.....	70
Fig. 26. Corrélation entre les paramètres chimiques et nombre moyen de spores	71
Fig. 27. Analyse en composante principale entre les genres de CMA et des ZAE	72
Fig. 28. Caractéristiques macroscopique et microscopique des d'isolats de <i>P. pachyrhizi</i>	73
Fig. 29. Formes des urédospores de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> dans les cinq zones agro-écologiques du Cameroun observées au grossissement X 100.....	74
Fig. 30. Cluster de classification des tailles des urédospores en fonction de leur rapport Longueur/largeur	76

Fig. 31. Rendement en t/ha des 43 variétés de soja en condition naturelle d'infection.....	81
Fig. 32. Dendrogramme de criblage des 43 variétés de soja en fonction des moyennes des incidences, sévérités et rendement dans les conditions d'infection naturelles.....	82
Fig. 33. Effet des CMA sur la hauteur de la tige (NM : non mycorrhizé ; M : mycorrhizé).....	85
Fig. 34. Rendements en t/ha des variétés en fonction des différents traitements en serre.....	95
Fig. 35. Variation de la teneur en phénol total en fonction des traitements en serre	97
Fig. 36. Variation de la teneur en phénol total en fonction des traitements dans le site de Mfou	98
Fig. 37. Variation de la teneur en phénol total en fonction des traitements dans le site de Bangangté.....	98
Fig. 38. Variation de la teneur en flavonoïde en fonction des traitements en serre	99
Fig. 39. Variation de la teneur en flavonoïde en fonction des traitements à Mfou	99
Fig. 40. Variation de la teneur en flavonoïde en fonction des traitements à Bangangté	100
Fig. 41. Variation de la teneur en protéines totales en fonction des traitements en serre	100
Fig. 42. Variation de la teneur en protéines totales en fonction des traitements à Mfou.....	101
Fig. 43. Variation de la teneur en protéines totales en fonction des traitements à Bangangté	101
Fig.44. Variation de la teneur en tannins en fonction des traitements en serre	102
Fig.45. Variation de la teneur en tannins en fonction des traitements à Mfou	103
Fig.46. Variation de la teneur en tannins en fonction des traitements à Bangangté	103
Fig.47. Variation de l'activité enzymatique de la glucanase en fonction des traitements en serre ...	104
Fig 48. Variation de l'activité enzymatique de la glucanase en fonction des traitements à Mfou	104
Fig.49. Variation de l'activité enzymatique de la glucanase en fonction des traitements à Bangangté	105
Fig. 50. Variation de l'activité des polyphénoloxydases en fonction des traitements en serre	105
Fig.51. Variation de l'activité des polyphénoloxydases en fonction des traitements à Mfou.....	106
Fig.52. Variation de l'activité des polyphénoloxydases en fonction des traitements à Bangangté ...	106
Fig.53. Variation l'activité enzymatique des peroxydases en fonction des traitements en serre	107
Fig.54. Variation l'activité enzymatique des peroxydases en fonction des traitements à Mfou.....	108
Fig.55. Variation l'activité enzymatique des peroxydases en fonction des traitements à Bangangté .	108
Fig. 56. Chromatogramme des composés phénoliques dans les feuilles de soja après inoculation des CMA et infection par <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	112
Fig. 57. Variation du rendement en t/ha entre les variétés en fonction des différents traitements dans le site de Bangangté	130
Fig. 58. Rendement en t/ha des variétés en fonction des différents traitements dans le site de Mfou	131

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Les derniers remaniements de la classification des rhizobia selon Weir, 22 Février.....	27
Tableau II. Différentes variétés de soja et leur origine	43
Tableau III. Coordonnées des localités par zone agro-écologique	45
Tableau IV Dénomination et origines des isolats de <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	49
Tableau V. Echelle d'estimation des degrés d'infection	52
Tableau VI. Composition physico-chimique des sols de la rhizosphère de soja par ZAE	64
Tableau VII. Description morphologique de différentes spores.....	65
Tableau VIII. Densité moyenne des spores dans 100 g de sol dans les différentes zones agro- écologiques.	66
Tableau IX. Densités moyennes de spores en fonction des couleurs par ZAE	67
Tableau X. Densités moyennes des spores selon leurs tailles dans les différentes zones agroécologiques.	68
Tableau XI. Densités moyennes des spores suivant leurs structures caractéristiques en fonction des zones agro-écologiques.	68
Tableau XII. Indices de diversité des zones agro-écologiques (ZAE).....	69
Tableau XIII. Classification des différents Champignons mycorhiziens à arbuscules identifiés.....	70
Tableau XIV. Fréquences de mycorhization des ZAE.....	72
Tableau XV. Morphométrie des urédospores des isolats de <i>P.pachyrhizi</i> entre les sites par ZAE et entre les ZAE.	75
Tableau XVI. Agréssivité des différents isolats au cours des différentes prises de données.....	77
Tableau XVII. Variation de l'incidence de la maladie en fonction des variétés et des semaines	78
Tableau XVIII. Variation de la sévérité de la maladie en fonction des variétés et du temps	80
Tableau XIX. Variation de la hauteur de la tige en fonction des variétés et des traitements.....	84
Tableau XX. Variation du diamètre au collet en fonction des variétés et des traitements.....	86
Tableau XXI. Variation du nombre de feuilles en fonction des traitements et variétés	88
Tableau XXII. Variation de l'incidence(%) en fonction des traitements et des variétés.....	90
Tableau XXIII. Variation de la sévérité en fonction des variétés et des traitements.....	92
Tableau XXIV. Variation de la fréquence et de l'intensité de mycorhization en fonction des variétés et des traitements	94
Tableau XXVI. Matrice des coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés en serre.....	110
Tableau XXVII. Composés phénoliques identifiés dans les feuilles de soja non mycorhizé et mycorhizé de la variété R3(V2) par DAD-HPLC	114

Tableau XXVIII. Composés phénoliques identifiés dans les feuilles de soja non mycorhizé et mycorhizé de la variété TGX-1835-10 E (V1) par DAD-HPLC.....	115
Tableau XXIV. Effet des traitements sur la hauteur de la tige en fonction des variétés et des sites..	118
Tableau XXX. Effet des traitements sur le diamètre au collet en fonction des variétés et des sites..	120
Tableau XXXI. Effet des traitements sur le nombre de feuilles en fonction des variétés et des sites.	122
Tableau XXXII. Effet des traitements sur l'incidence (%) de la maladie en fonction des variétés et sites au cours du temps.....	125
Tableau XXXIII. Effet des traitements sur la sévérité (%) de la maladie en fonction des variétés et des sites au cours du temps.....	127
Tableau XXXIV. Variation de la fréquence et l'intensité de mycorhization I(%) dans les traitements en fonction des variétés et des sites	129
Tableau XXXV. Matrice des coefficients de corrélation(Pearson) entre les paramètres étudiés en champ dans le site de Mfou.....	132
Tableau XXXVI. Matrice des coefficients de corrélation (Pearson) entre les paramètres étudiés en champ dans le site de Bangangté.....	133
Tableau XXXVII. Teneur des différents composés biochimiques et activités enzymatiques	135
Tableau XXXVIII. Corrélation entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques et composé biochimique dans le site Mfou.....	137
Tableau XXXIX. Corrélation entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques et composé biochimique dans le site de Bangangté.....	139

LISTE DES ABREVIATIONS

CMA	Champignons mycorhiziens à arbuscules
ZAE	Zone agroécologique
SAS	Semaine Après Semis
ANOVA	Analyse des variances (Analysis of Variance)
IRAD	Institut de Recherche Agricole pour le Développement
SAR	Systemic acquired resistance
MINADER	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
IITA	International Institut of tropical Agriculture
GPS	Global Positioning System
LSD	Last Significant difference
PPO	Polyphénoloxydase
HCDSS	Hyphe collé directement au sac sporifère
BS	Bulbe suspenseur
MCSS	Membrane collé au sac sporifère
PFMD	Présence d'un filament membranaire en dégénérescence
JAI	Jours après semis
HPLC	High performance liquid chromatography

RESUME

Phakopsora pachyrhizi est un Basidiomycètes responsable de la rouille asiatique qui est l'une des maladies du soja (*Glycine max*) les plus redoutables au niveau mondial. Au Cameroun en particulier elle constitue une contrainte majeure de sa production, occasionnant des pertes allant jusqu'à 90 % si aucune action sanitaire n'est entreprise. Toutefois, *Phakopsora pachyrhizi* peut être contrôlé par l'utilisation des substances chimiques de synthèse qui sont toxiques pour l'environnement et la santé humaine. L'une des alternatives à cette méthode est la stimulation et/ou l'optimisation des mécanismes de défense mis en place lors de l'interaction plante-parasite via l'utilisation des champignons mycorrhiziens à arbuscules (CMA). L'objectif général de ce travail était d'étudier l'efficacité bioprotecteur des CMA sur le développement de la rouille asiatique dans la production du soja au Cameroun. L'extraction des CMA de la rhizosphère du soja a été réalisée trois mois après piégeage dans 25 échantillons (sol et racines) prélevés dans les cinq zones agroécologiques (ZAE). Les morphologies et les morphométries des différentes urédospores de l'agent pathogène ont été déterminées sur 34 isolats et l'agressivité des isolats a été évaluée. Pour évaluer la performance des variétés testées, 43 variétés de soja ont été criblées en utilisant un dispositif en blocs de Fisher complètement randomisés à trois répétitions. Les paramètres épidémiologiques et les rendements ont été évalués. Pour les tests en serre et en champ, deux variétés de soja ont été utilisées (TGX-1835-10E et R3), avec 14 traitements mycorrhisés dont quatre traitements monospores (T1, T2, T3, T4), 10 traitements composites (T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13 T14) d'environ 1000 spores dans 100 g de sol, le traitement au fongicide (T0⁺) et témoin négatif (T0⁻). L'inoculation du pathogène en serre s'est effectuée à la quatrième semaine après semis, avec une suspension de 3×10^2 urédospores par goutte d'inoculum. En champ, la contamination s'est faite de manière naturelle. Les paramètres de croissances, rendements, épidémiologiques, de mycorrhization et biochimiques ont été évalués. Les résultats ont montré que les ZAE II et III présentent une plus large diversité des CMA du point de vue couleurs. Du point de vue taille, le tamis de maille 125 μ m a présenté la plus grande densité de spores. 16 morphotypes ont été repertoriés et regroupés en 9 genres (*Gigaspora*, *Entrophopora*, *Scutellospora*, *Dentiscutata*, *Rhizophagus*, *Paraglomus*, *Clarodeoglomus*, *Racocetra*, *Diversispora*) avec la dominance des genres *Gigaspora* et *Entrophopora*. Les indices de diversité sont faibles dans les ZAE. Les résultats sur la caractérisation des isolats de *P. pachyrhizi* au Cameroun présentent une variation significative des caractères morphologiques des urédospores du pathogène. 7 formes ont été observées avec apparition de deux nouvelles formes: pépiniformes et anguleuses. Les 34 isolats de *P. pachyrhizi* obtenus ont été pathogéniques avec un degré d'agressivité variant d'un isolat à un autre. Les isolats les plus agressifs

ont été obtenus dans les ZAE II (GA1, WA, MB), ZAEIII (BAM) et la ZAE V (MF2). Le dendrogramme réalisé à partir des 43 variétés criblées a permis de les regrouper en variétés très sensibles (R3, SCS-1), sensibles (AFAYAK, TGX-1835-10E) et moyennement résistant (TGX-2010-12F, TGX-2010-3F). Les résultats de l'essai réalisé en serre sur les paramètres de croissance comme la hauteur de la tige, le diamètre au collet, le nombre de feuilles et les rendements ont montré que la mycorhization a influencé positivement sur ces différents paramètres. Les taux d'augmentation du rendement de 89,52 ; 89,52 ; 89,32 % avec le traitement T6, T13 et T14 par rapport au témoin négatif et de 48,57 ; 48,57 ; 47,57 % par rapport au traitement au fongicide respectivement chez les deux variétés ont été enregistrés. L'analyse a montré une corrélation fortement négative entre les paramètres épidémiologies (incidence et sévérité), les paramètres de mycorhization et la synthèse des composés biochimiques. Ainsi la mycorhization a réduit significativement la sévérité de la maladie comparée au traitement fongique ($T0^+$) et au témoin négatif ($T0^-$). Dans l'ensemble, des taux de réduction de l'ordre de 97,22 ; 95,55 ; 95,26 ; 95,26 et 63,79 % respectivement ont été obtenus avec les traitements mycorhizés T9, T6, T14, T13 et le traitement au fongicide par rapport au témoin négatif. En champ, L'inoculation mycorhizienne a entraîné une augmentation significative de la hauteur de la tige, le nombre de feuilles et les rendements mais a été sans effet significatif sur le diamètre au collet dans les deux sites. Les rendements les plus élevés ont été obtenus chez la variété TGX-1835-10 E dans les deux sites par rapport à la variété R3. Dans le site de Bangangté les rendements les plus élevés étaient de 1,87; 1,67; 1,57 et 1,45 t/ha avec les traitements mycorhizés T13, T3, T6 et T14 respectivement par rapport au témoin négatif (0,74 t/ha). A Mfou, les rendements les plus élevés de 1,63; 1,5; 1,46 t/ha avec les traitements mycorhizés T3, T6 et T13 respectivement ont été enregistrés par rapport au témoin négatif (0,79 t/ha). L'inoculation mycorhizienne et le traitement au fongicide entraînent une réduction significative de la sévérité de la maladie. Des taux de réduction de l'ordre de 62,12 ; 61,96 ; 60,18 et 38,90 % ont été obtenus respectivement avec le traitement T14, T13, T6 et le traitement au fongicide comparé au témoin négatif à Bangangté. A Mfou des taux de réduction de 89,24 ; 89,11 ; 88,90 et 82,25 % ont été obtenus respectivement avec le traitement T3, T13, T6 et le traitement au fongicide comparé au témoin négatif. L'inoculation des plantes de soja par les CMA favorise le développement des paramètres de croissance et le rendement, mais aussi augmente la résistance des plantes par stimulation des mécanismes de défense dans les conditions favorables de culture.

Mots clés *Phakopsora pachyrhizi*, *Glycine max*, CMA, diversité, Résistance; métabolites

ABSTRACT

Phakopsora pachyrhizi is a Basidiomycete causing for Asian rust which is one of the most serious diseases of soybean (*Glycine max*) worldwide. In Cameroon in particular, it constitutes a major constraint on its production and related losses of up to 90 % if no health action is taken. However, *P. pachyrhizi* can be controlled by the use of synthetic chemicals which are toxic to the environment and human health. One of the alternatives to this method is the stimulation and / or optimization of the defense mechanisms put in place during the plant-parasite interaction through the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). The general objective of this work was to assess the bioprotective effect of AMF on the development of Asian rust in soybean production in Cameroon. The extraction of AMF from the soybean rhizosphere was carried out three months after trapping in 25 samples (soil and roots) taken from the five agroecological zones (AEZ). The morphologies and morphometries of the different uredospores of pathogenic silver were determined on 34 isolates and the aggressiveness of the isolates was evaluated. To assess the performance of the host plant, 43 soybean varieties were screened using a three-repeat fully randomized Fisher block device. The epidemiological parameters and the yields were evaluated. For the greenhouse and field trials, two soybean varieties were used (TGX-1835-10 E and R3), with 14 mycorrhizal treatments including four monospore treatments (T1, T2, T3, T4), 10 composite treatments (T5 , T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13 T14) of approximately 1000 spores in 100 g of soil, treatment with fungicide (T0 +) and negative control (T0-). Inoculation of the pathogen in the greenhouse was carried out on the fourth week after sowing, with a suspension of 3×10^2 uredospores per drop of inoculum. In the field, contamination happened in a natural way. Growth, yield, epidemiological, mycorrhization and biochemical parameters were evaluated. The results showed that AEZ II and III exhibit greater color diversity of AMF. From a size perspective, the 125 μ m mesh sieve exhibited the highest spore density of AMF. 16 morphotypes were listed and grouped into 9 genera (Gigaspora, Entrophopora, Scutellospora, Dentiscutata, Rhizophagus, Paraglomus, Claroideoglomus, Racocetra and Diversipora) with the dominance of the genera Gigaspora and Entrophopora. Diversity indices were low in AEZ. The characterization of *P. pachyrhizi* isolates indicated a significant variation in the morphological characters of the pathogen uredospores, with the appearance of 7 forms, of which two were new: pepiniform and angular. The 34 *P. pachyrhizi* isolates obtained were pathogenic with varying degrees of aggressiveness from one isolate to another. The most aggressive isolates were obtained in AEZ II (GA1, WA and MB), AEZ III (BAM) and AEZ V (MF2). The dendrogram produced from the 43 screened varieties enabled their classification into very sensitive (R3, SCS-1), sensitive (AFAYAK, TGX-1835-10E) and moderately resistant (TGX-2010-12F, TGX-2010-3F). The greenhouse tested growth parameters such as stem height, crown diameter, number of leaves and yields showed that mycorrhization

positively influenced these various parameters. The rates of yield increase of 89.52 ; 89.52; 89.32 % with the T6, T13 and T14 treatment compared to the negative control and 48.57; 48.57; 47.57% compared to the fungicide treatment respectively in the two varieties were registered. There was a strong negative correlation between epidemiological parameters (incidence and severity), mycorrhization parameters and the synthesis of biochemical compounds. Thus mycorrhization significantly reduced the severity of the disease compared to fungal treatment (T0 +) and negative control (T0-). Overall, reduction rates of around 97.22; 95.55; 95.26; 95.26 and 63.79 % respectively were obtained with the mycorrhizal treatments T9, T6, T14, T13 and the fungicide treatment compared to the negative control. In the field, mycorrhizal inoculation resulted in a significant increase in stem height, number of leaves and yields but had no significant effect on crown diameter at both sites. The highest yields were obtained from variety TGX-1835-10 E at both trials compared to variety R3. At Bangangté the highest yields were 1.87; 1.67; 1.57 and 1.45 t/ha with the mycorrhizal treatments T13, T3, T6 and T14 respectively compared to the negative control (0.74 t/ha). At Mfou, the highest yields of 1.63; 1.5; 1.46 t/ha with the mycorrhizal treatments T3, T6 and T13 respectively were recorded compared to the negative control (0.79 t/ha). Mycorrhizal inoculation and treatment with fungicide significantly reduce the severity of the disease. Reduction rates of around 62.12; 61.96; 60.18 and 38.90 % were obtained respectively with the T14, T13, T6 treatment and the fungicide treatment compared to the negative control at Bangangté. At Mfou reduction rates of 89.24; 89.11; 88.90 and 82.25 % were obtained respectively with the T3, T13, T6 treatment and the fungicide treatment compared to the negative control. Inoculation of soybean plants with AMF resulted in the enhancement of growth and yield parameters, as well as increased plant resistance by stimulating defense mechanisms under favorable growing conditions.

Keywords *Phakopsora pachyrhizi*, *Glycine max*, AMf, diversity, resistance; metabolites

INTRODUCTION

Le soja (*Glycine max*) est une plante annuelle de la famille des Fabacées, Originnaire d'Asie de l'Est. Il est cultivé pour ses graines très riches en protéines (30 à 40 %), en lipides (20 %), en glucides (35 % dont 20 % de fibres) et en minéraux et vitamines (5 %) (Jacques, 2010). Ces protéines jouent un rôle de régulateur du cholestérol sanguin, contribuant de ce fait à la réduction des risques de contractation des maladies cardio-vasculaires (Collomb & Mayor 2007). L'essentiel des graines de soja produites mondialement est trituré pour être transformé soit en tourteau pour l'alimentation animale, en huile pour la consommation humaine ou est utilisé comme agrocarburant. Après l'huile de palme, l'huile de soja est la deuxième huile la plus consommée dans le monde (Anonyme 1, 2011). Comestible sous plusieurs formes, ses graines sont en générales transformées et consommées sous forme de boisson, communément appelée lait de soja (Haesslein & Oreiller, 2008). Sa production mondiale a été de 333671692 tonnes sur une superficie de 120501628 hectares en 2019. En Afrique elle a été de 3097318 tonnes sur une superficie de 2470555 hectares en 2019 (Anonyme 2, 2021). Au Cameroun, le soja a été introduit au cours du 20^e siècle et était surtout cultivé dans la zone des hauts plateaux de l'Ouest où un paquet de technologies (variétés, dates et densités de semis, système de culture, conservation des semences) avait été mis au point à la station IRAD de Dschang et vulgarisé en milieu paysan dans le cadre du démarrage du projet soja en 1980. Aujourd'hui sa culture se pratique dans les cinq zones agroécologiques. La production annuelle nationale est passée de 7555 tonnes sur une superficie de 12135 hectares soit un rendement de 623 Kg/ha en 2006 (Anonyme 3, 2013) à 23058 tonnes sur une superficie de 15957 hectares en 2019 (Anonyme 4, 2021). Malgré cette augmentation la demande reste supérieure à la production car chaque année le Cameroun dépense 14 milliards de FCFA pour l'importation du soja (Anonyme 4, 2021). La faible production par rapport à la demande peut être liée à la faible fertilité des sols, aux ravageurs et aux maladies (Wagara *et al.*, 2011). Parmi les maladies, les plus importantes sont d'origine fongique notamment la rouille asiatique du soja causée par *Phakopsora pachyrhizi*. En Afrique et au Cameroun en particulier, elle constitue une contrainte majeure de sa production. C'est un Basidiomycètes de la famille des Phakopsoraceae (Ono *et al.*, 1992) capable d'infecter à l'état naturel 95 espèces dans 42 genres des légumineuses (Wang & Hartman, 1992). *P. pachyrhizi* se développe à des températures comprises entre 15 et 28 °C. C'est un champignon biotrophe qui se développe et ne fructifie que sur des fragments végétaux vivants (Blum *et al.*, 2015). Les urédospores de *P.pachyrhizi* se déplacent facilement en saison des pluies et en haute période d'humidité (Hartman *et al.*, 2011). Ce champignon attaque la partie aérienne de la plante entraînant la diminution des surfaces foliaires vertes, la baisse de l'activité photosynthétique, la défoliation prématurée et l'obtention des graines immatures. On estime alors des pertes énormes de la production du soja qui se situent entre 10 et 90

% en culture mixte, entre 10 et 100 % en monoculture pour l'Afrique en général et de 80 % pour le Cameroun en particulier (kumudini *et al.*, 2008).

Plusieurs méthodes de lutte sont utilisées contre cet agent pathogène. parmi lesquelles les pratiques culturales (comme la destruction d'hôtes alternatifs, l'irrigation en temps opportun, la plantation précoce et la croissance des cultivars à maturation précoce) qui peuvent réduire l'incidence de la maladie (Akinsanmi *et al.*, 2001). La lutte chimique, avec l'utilisation des fongicides de plusieurs classes possédant différents modes d'action (Miles *et al.*, 2007). La lutte génétique, qui repose sur l'identification et l'introduction des gènes de résistance dans le but d'une sélection des variétés ayant une bonne valeur agronomique et une bonne résistance à la rouille asiatique du soja. Cette sélection variétale a permis d'identifier des génotypes de soja possédant une résistance spécifique à un isolat du pathogène (Li *et al.*, 2012). L'utilisation de ces gènes pour le développement de variétés de soja résistant à la rouille a été compliquée par la grande variabilité au sein de *P. pachyrhizi*. De plus, l'existence de multiples facteurs de virulence dans l'agent pathogène de la rouille implique que la résistance basée sur les gènes simples pourrait ne pas être durable compte tenu de la nature polycyclique du pathogène (Hartman *et al.*, 2005). Cependant la rareté des données se référant à la résistance des variétés de soja (nouvellement introduite) à la maladie de rouille asiatique au niveau local mérite une attention particulière dans une alternative à la lutte chimique.

La rouille asiatique du soja peut présentement être réprimée par l'utilisation des fongicides de plusieurs classes possédant différents modes d'action (Miles *et al.*, 2007). Leur efficacité dépend du moment de l'application et de la pression de la maladie (Mueller *et al.*, 2009). Le retardement de l'application après l'établissement de la maladie entraîne des rendements incohérents (Miles *et al.*, 2003). Toutefois l'utilisation massive des fongicides, a conduit à la sélection directionnelle des isolats de *P. pachyrhizi* résistante à une matière active précise (chlorothalonil, mancozeb, copper oxychloride) (van den Bosch *et al.*, 2015). Ainsi il y a apparition des pathotypes nouveaux au vu de la pression de sélection et d'une variabilité de la virulence en fonction de leur réaction sur des hôtes différents (Bonde *et al.*, 2006; Miles *et al.*, 2006; Pham *et al.*, 2009). De nombreux travaux ont confirmé la variabilité de la virulence des isolats de *P. pachyrhizi* pour une localité géographique donnée (Murithi *et al.*, 2017). La caractérisation au niveau local des différents isolats de *P. pachyrhizi* reste essentielle pour la mise au point d'une stratégie rationnelle et efficace de lutte contre la maladie (Schiffers & Moreira, 2011; Cooke *et al.*, 2012)

Par ailleurs les coûts élevés des fongicides chimiques et leur effet nocif sur la santé des consommateurs et l'environnement rend inadaptes l'utilisation des fongicides à la gestion de la maladie dans les pays en développement. L'une des méthodes alternatives repose sur la stimulation et ou l'optimisation des mécanismes de défense naturelle des plantes mis en place lors de l'interaction

plante –parasite. Elle consiste à la stimulation des défenses naturelles par des éliciteurs qui sont de plus en plus considérés comme des approches phytosanitaires capables d’assurer une protection efficace contre les maladies (Benhamou et Rey 2012). Ces stimulateurs de défenses naturelles peuvent être d’origine diverse : naturelle (végétale: extraits d’algues ou de plantes supérieures ; hormonale: brassinostéroïdes; microbienne: extraits des microorganismes tels que les champignons, levures bactéries...) ou synthétique (Acides aminés BABA) (Rittmo *et al.*, 2010). Les champignons mycorhiziens à arbuscule présentent des propriétés exceptionnelles dans la symbiose notamment sur la croissance et l’induction de la résistance aux stress abiotique et biotique. Ces champignons sont le type le plus commun et répandu des mycorhizes. Ils établissent une symbiose à bénéfice réciproque avec les racines d’environ 80 % des plantes terrestres dans différents écosystèmes (Bonfante et Perrotto, 1995) et interagissent avec presque toutes les familles de plantes, y compris de nombreuses espèces agricoles importantes. Les avantages de symbioses mycorhiziennes ont reçu une attention accrue en raison de l'amélioration de la nutrition des plantes et aussi par ce qu'ils peuvent augmenter la résistance des plantes aux agents pathogènes des racines et des stress abiotiques (Azcón-Aguilar et Barea 1996). La réduction des paramètres de la maladie à la suite de l'association mycorhizienne a été démontrée pour une gamme de protistes et champignons pathogènes (Singh *et al.*, 2000). Les travaux d’Ismail *et al.* (2013) ont montré que certains CMA comme *Glomus irregulare* peuvent réduire la production des mycotoxines de certains champignons. Par ailleurs, la mycorhization conduit la plante dans un état actif d’immunisation qui lui permet d’être efficace dans ses réponses aux attaques des pathogènes (Jung *et al.*, 2012). En outre, l’accumulation de certains composés du métabolisme secondaire, en particulier l’augmentation des teneurs en composés phénoliques et la production de phytoalexines (Morandi, 1989), observées chez les plantes endomycorhizées pourraient être également responsables de l’inhibition des agents pathogènes. La compréhension de la diversité et la dynamique des CMA dans leur environnement naturel est importante pour une culture donnée, pour la fertilisation des sols et la lutte contre les maladies. Au vu de ce qui précède, les questions de recherche de la présente étude centrée sur la réduction de l’impact de la rouille asiatique du soja sont entre autres:

- 1) quel est la diversité des CMA dans la rhizosphère du soja au Cameroun?
- 2) existe-t-il une diversité dans les populations de *P.pachyrizi*, agent causal de la rouille asiatique du soja dans les cinq zones agroécologiques du cameroun?
- 3) parmi les variétés tester existe-t-il des variétés développant une tolérance à la rouille asiatique du soja du point de vue agronomique et épidémiologiques?
- 4) les CMA de la rhizosphère du soja peuvent-ils réduire le développement de la rouille asiatique en serre et en champ?

Les hypothèses de recherche formulées autour de ces questions sont:

- l'expression de la maladie est due à la faible densité et à la richesse spécifique des CMA dans la rhizosphère des plantes de soja;
- les populations de *P.pachyrizi* au Cameroun sont très diversifiées;
- parmi les variétés testées il existe celle tolérante à la rouille asiatique du soja;
- la mycorhization du soja par les CMA natives de la rhizosphère réduit significativement la sévérité et l'incidence de la maladie.

Le présent travail a pour objectif général d'étudier l'efficacité bioprotecteur des CMA sur le développement de la rouille asiatique dans la production du soja au Cameroun. Plus spécifiquement il était question de :

- évaluer la diversité des CMA dans la rhizosphère des plants de soja dans les cinq zones agroécologiques;
- décrire les caractères phénotypiques des différents isolats collectés;
- cribler les variétés de soja tolérantes à la rouille asiatique du soja en champ;
- déterminer en serre et en champ l'effet des CMA isolés sur le développement de *Phakopsora pachyrhizi* et production des composés biochimiques.

Le présent travail présente des intérêts sur plusieurs plans entre autres scientifique, environnemental et économique.

Sur le plan scientifique le présent travail fait état d'une inégale distribution de la diversité des CMA dans la rhizosphère du soja des cinq zones agroécologiques du Cameroun. Par ailleurs, les données sur la diversité et l'agressivité des urédospores de *Phakopsoara pachyrhizi* en fonction des zones agroécologiques sont désormais bien connues au Cameroun.

Sur le plan environnemental, l'utilisation des CMA qui sont des microorganismes du sol apportent une amélioration de la nutrition minérale des plantes, tout en préservant l'écosystème par la réduction de la pollution et la perturbation des équilibres écologiques causée par les produits chimiques qui engendrent la plupart du temps l'apparition des pathotypes nouveaux et des souches résistantes.

Sur le plan économique, le Cameroun dépense 14 milliard de FCFA par ans pour l'importation du soja. La culture de ce dernier inoculée aux CMA dans cette étude a permis de booster les rendements de 28,96 % à l'hectare. Ce qui représente 0,42 t soit un montant d'environ 135 000FCFA à l'hectare. Cela contribuerait à réduire la dépendance à l'importation de 15,32 %.

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.1. Soja (*Glycine max*)

I.1.1. Histoire et distribution

Le soja encore appelé soya, pois chinois ou haricot oléagineuse est une légumineuse originaire de l'Asie de l'est plus précisément au Nord de la Chine (Yinghui *et al.*, 2008, cit. Vavilov, 1951). Sa culture en Chine se retrace depuis 3000 ans comme l'atteste les anciens livres et découvertes archéologiques, ou il a été domestiqué pour la première fois. Selon un mythe chinois le soja appartient aux cinq plantes sacrées dont le riz, le blé, l'orge, le millet (Zhao & Gai, 2004). D'après les premiers auteurs le soja produit était localisé en Chine jusqu'après la guerre Chine-Japon entre 1894-1895. Le soja arrive en Europe en 1908 puis s'étend dans le reste du monde (Lance Gibson & Garren Benson, 2005). Cependant ses intérêts agricoles ne seront exploités qu'au milieu du 18^{ème} siècle (Bromfield, 1984). La plante se retrouvera sur le continent américain au milieu de 19^{ème} siècle et la production aux États-Unis dépassera celle de la Chine et éventuellement de tout l'Orient au milieu du 20^{ème} siècle (Hymowitz, 1970). Du côté de l'Amérique, les élevages de porcs, de volailles et de bétails sont à l'origine de l'essor de cette graine sur le continent. Le tourteau de soja, issu de l'extraction industrielle de l'huile de la graine de soja, contient une forte teneur en protéines (47 %) (Prolea, 2011) et une bonne teneur en lysine, en faisant un incontournable dans les élevages intensifs. Les États-Unis à ce jour sont le principal pays producteur. En 2009, leur production en tonnes représentait 41 % de la production mondiale totale, suivi du Brésil (26 %) et de l'Argentine (14 %). En termes de superficie, ces trois pays représentent à eux seuls 70 % de la surface mondiale cultivée en soja (Anonymes 5, 2011).

Au Canada, la culture du soja en tant qu'oléagineux commercial a débuté au sud de l'Ontario dans les années 1920. Le développement de variétés hâtives et tolérantes au climat plus frais a permis d'étendre cette culture au reste du Canada dans les années 1970. En 1976, la superficie en soja au Canada était de 154 000 ha. En 2006, la superficie était huit fois plus élevée avec plus de 1 200 000 ha cultivés (Dorff, 2007). Au Québec, les superficies de soja cultivées sont en croissance constante depuis le début des années 1980. Les progrès en matière de sélection génétique ont permis d'augmenter les superficies au Québec de façon spectaculaire passant de 240 à 178 000 ha entre 1976 et 2006. Selon certaines sources, le soja aurait été introduit en Afrique à la fin du XIX^{ème} siècle et s'est répandu à travers le continent. Au Cameroun elle a été introduite par le projet de promotion et de vulgarisation de sa culture à l'IRAD de Dschang en 1980. Dans la zone Soudano-Sahélienne, l'IRAD de Garoua a entrepris depuis 2007 une recherche variétale sur le soja en partenariat avec la SODCOTON (Société de développement du coton). Cette recherche s'effectue dans le cadre de la

diversification des cultures par rapport à la culture de coton. La progression de la culture dans cette zone, contrôlée par la SODECOTON, est encourageante. Elle a en effet augmenté de 2 000 ha à plus de 10 000 ha entre 2007 et 2012. Principalement cultivée dans la zone des hauts plateaux de l'Ouest, sa culture se pratique aujourd'hui dans les cinq zones agro écologiques ou La production annuelle nationale est passée 7555 tonnes sur une superficie de 12135 hectares en 2006 (Anonyme 3, 2013), à 23058 tonnes sur une superficie de 15957 hectares en 2019 (Anonyme 2, 2021).

I.1.2. Classification et biologie

Glycine max ou soja cultivé appartient au Règne végétal, Sous règne Tracheobionta, Embranchement des Spermaphytes, Sous embranchement des Angiospermes, Division des Magnoliophyta, Classe des Magnoliopsida, Sous-classe des Rosidae, Ordre des Fabales, Famille des Fabaceae, Sous-famille des Faboideae, Tribu des phaseoleae, Sous-tribu des Glycininae, Genre : *Glycine*, Sous genre : soja, Espèce : *Glycine max*. (Chandra, 2012). Il s'agit d'une espèce tétraploïde diploïdisée $2n = 40$, hermaphrodite et autogame. Le stigmate commence à être réceptif environ 24 heures avant l'anthere et le demeure pendant 48 heures après l'anthere (Anonyme 6, 1966). Les anthères mûrissent dans les bourgeons et pollinisent directement les stigmates de leur propre fleur. Le taux d'autogamie est donc élevé, et la pollinisation croisée se produit dans moins de 1 % des cas (Caviness, 1966). Aucune précaution particulière ne doit être prise quant à l'autofécondation des fleurs de soja. Elle est une fécondation cléistogame (autofécondation avant même que la fleur ne s'ouvre). Le taux d'hybridation étant extrêmement faible, l'hybridation des fleurs et le croisement artificiel sont fastidieux, car les composantes de la fleur sont extrêmement petites. La fécondation aboutit à des fruits sous forme de gousses bosselées, velues, déhiscentes, de longueur et de couleur variables en fonction des variétés, et contenant deux à quatre graines riches en protéines (Doré *et al.*, 2006)

I.1.3. Caractères botaniques du soja

Le soja est une plante annuelle herbacée de port dressé et peut atteindre une hauteur de 1,5 m. Il existe des cultivars de soja à croissance indéterminée, à croissance déterminée et à croissance semi-déterminée (Bernard & Weiss, 1973). Chez les génotypes à croissance déterminée l'activité végétative des bourgeons apicaux cesse dès que ceux-ci se transforment en inflorescence terminales ou axillaires, ces variétés se cultivent principalement dans le Sud des États-Unis. Chez les génotypes à croissance indéterminée, l'activité végétative se produit pendant la floraison, ces variétés se cultivent principalement dans les régions centrales et septentrionales de l'Amérique du Nord. Enfin chez les génotypes à croissance semi-déterminée la croissance est essentiellement indéterminée, mais

l'activité végétative cesse brusquement après la floraison (Anonyme 6, 1966). Le soja possède un port végétatif, un appareil reproducteur et un système racinaire à nodosité, caractéristique de la famille des Fabacées.

I.1.3.1. Appareil végétatif

L'appareil végétatif du soja comporte : un port érigé d'une hauteur de 30 à 150 cm, des feuilles alternes à trois folioles acuminées avec stipelles, qui tombent avant la maturité de la plante (Doré *et al.*, 2006). Les folioles mesurent de 6 à 15 cm de long et 2 à 7 cm de large (fig. 1). Comme chez le haricot, les deux premières feuilles sont entièrement opposées. Les feuilles tombent avant que les gousses ne soient arrivées à maturité.

I.1.3.2. Appareil reproducteur

L'appareil reproducteur du soja est caractérisé par :

- les fleurs isolées, petites, violettes ou jaunâtres, zygomorphes (avec un plan de symétrie), apparaissant à l'aisselle des feuilles, groupées en grappes de trois à cinq ;
- une corolle avec cinq pétales vexillaires (un pétale dorsale qui encadre deux pétales latéraux (ailes), qui eux resserrent deux pétales ventraux soudés (carène)) ;
- un calice avec cinq sépales soudés ;
- un androcé diadelphé (étamines assemblées en deux groupes) ;
- un gynécé composé d'un carpelle ;
- une fécondation cleistogame (autofécondation avant même que la fleur ne s'ouvre) ;
- des fruits sous forme de gousses bosselées et velues, déhiscents, de longueur et de couleur variable en fonction des variétés, et contenant deux à quatre graines riches en protéines (Doré *et al.*, 2006) (Fig. 1).

I.1.3.3. Racines à nodosités

Le système racinaire s'organise autour d'une racine pivot qui se ramifie en radicelles. Elles absorbent l'eau et les sels minéraux du sol indispensables à la survie de la plante (Chatenet, 2007). En plus d'utiliser l'azote minéral du sol pour la synthèse d'acides aminés et de protéines, les légumineuses telles que le soja, la lentille, la luzerne ont développé un moyen supplémentaire pour fixer l'azote de l'air. Elles vivent en symbiose avec certaines bactéries, qui récupèrent des glucides de la plante issue de la photosynthèse. En contrepartie, les bactéries synthétisent des acides aminés pour la plante, après fixation et réduction de l'azote de l'air du sol (N_2) en ammoniac (NH_4^+). Grâce à cette

voie symbiotique, le soja est donc une légumineuse qui nécessite peu d'engrais azotés, c'est pourquoi il est bien adapté à la production biologique. Par ailleurs les racines à nodosités (Fig.1) du soja améliorent la composition azotée du sol avant la culture d'autres plantes comme le blé ou le maïs (Labat, 2013).

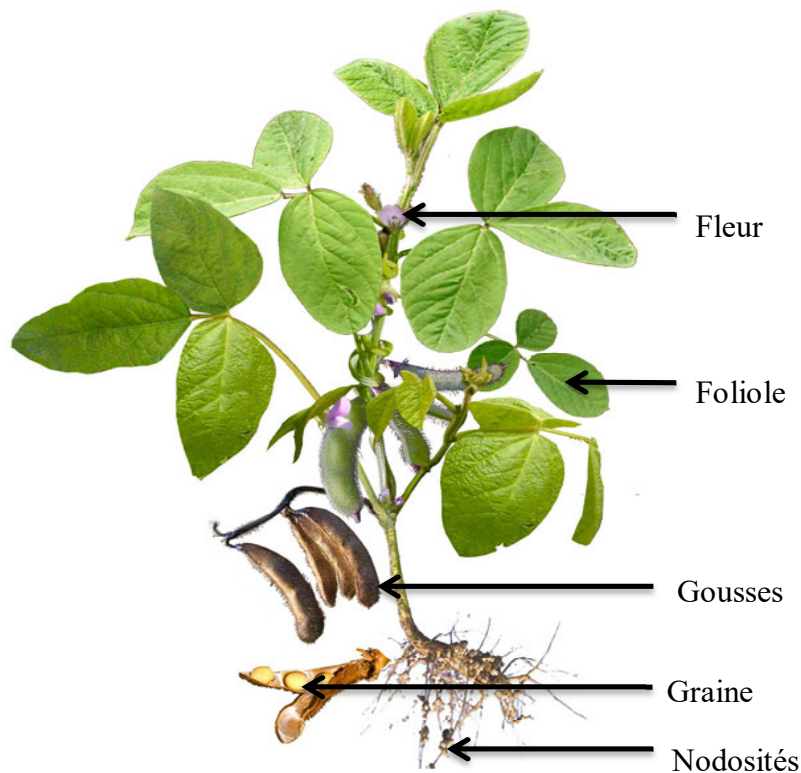


Fig. 1. Plante de soja (Guy Roulier 2012)

I.1.4. Conditions agro écologiques

Le soja se cultive sur climat chaud, dans de larges gammes de sols à pH compris entre 5,5 à 6,5. Ces conditions optimales de croissance nécessitent des températures moyennes de 20 à 30 °C, des sols humides alluviaux et une bonne teneur en matière organique. Les températures supérieures à 30 °C affectent négativement le développement et ceux inférieures à 13 °C, exposées pendant une longue période durant le stade de floraison, inhibent la formation des fleurs et des gousses (Chandra, 2012).

Le soja est une plante nyctipériodique préférante c'est-à-dire qu'elle fleurit plus vite dans les conditions de jour court (Garner & Allard, 1923). La graine germe quand la température du sol atteint 10 °C, et la levée a lieu 5 à 7 jours plus tard si les conditions sont favorables. Dans une nouvelle zone de production, il faut parfois inoculer le sol de *bradyrhizobium japonicum*, afin d'assurer l'efficacité maximale du système racinaire. Le soja ne vit pas bien dans les sols acides, qui peuvent nécessiter un amendement calcaire. Il est souvent cultivé en rotation avec des plantes comme le maïs, le blé

d'hiver, les céréales de printemps et les haricots secs (Anonyme 7, 2000). Aucune variété de soja ne résiste au gel ni ne survit aux conditions hivernales. Le sol limoneux convient le mieux au soja, tandis que le sol sableux peut causer le stress de sécheresse et le sol argileux lourd contribue à des problèmes au cours de l'ensemencement et de la levée (Anonyme 8, 2006).

I.1.5. Importance du soja

Le soja possède une composition extrêmement intéressante pour les nutritionnistes. La graine de soja est la plus riche en protéines du monde végétal et elle contient les 8 acides aminés essentiels de l'organisme (Anonyme 3, 2013). Globalement, la composition des graines de soja mûres et crues par 100 g de partie comestible est la suivante : eau (8,5 g); énergie (1742 kJ (416 kcal) ; protéines (36,5 g) ; lipides (19,9 g) ; glucides (30,2 g) ; fibres alimentaires (9,3 g) ; Ca (277 mg) ; Mg (280 mg) ; P (704 mg) ; Fe (15,7 mg) ; Zn (4,9 mg) ; vitamine A (0 UI) ; thiamine (0,87 mg) ; riboflavine (0,87 mg) ; niacine (1,6 mg) ; vitamine B (0,38 mg) ; folates (375 µg) et acide ascorbique (6,0 mg) (Anonyme 9, 2004). Ce qui fait d'elle une oléagineuses aux fins multiples.

En moins d'un demi-siècle, l'importance économique mondiale du soja a explosé. Cette espèce est passée du statut de plante fourragère et de plante dédiée au régime alimentaire asiatique au statut de production agricole de première importance et de fer de lance de l'intensification agricole (Roumet *et al.*, 2010). C'est ainsi que la culture du soja dans les années 1967 a favorisé l'industrialisation du Brésil et rétablit l'équilibre de la balance de paiement (Derli & Eduardo, 1990). L'essentiel des graines de soja produites mondialement est trituré pour être transformé soit en tourteau pour l'alimentation animale, en huile pour la consommation humaine ou est utilisé comme agrocarburant. Après l'huile de palme, l'huile de soja est la deuxième huile la plus consommée dans le monde (Anonyme 1, 2011). Dans l'alimentation humaine, on retrouve aussi le soja sous différentes formes dont les plus connues sont la farine, le lait de soja, le tofu, le miso et différentes sauces comme la sauce shoyuh et tamari.

Le soja est un aliment fonctionnel présentant un profil intéressant de composés bénéfiques pour la santé humaine. Il améliore l'état du bien-être et diminue le risque de maladie (Robertfroid, 2000). Les germes de soja (aliment fermenté) permettent de maintenir l'équilibre du profil hormonal de la femme post ménopausée (Pétri *et al.*, 2004) et de réduire le nombre de bouffées de chaleur survenant au moment de la ménopause (Szkutnik-Fiedler *et al.*, 2010). Cet ingrédient permet d'augmenter les lipoprotéines de haute densité (HDL) correspondant au bon cholestérol et de diminuer la pression sanguine (Bruckert & Rosenbaum, 2011). L'administration des germes de soja a

été associée à des propriétés préventives du développement des tumeurs au niveau des cellules mammaires chez le rat (Zaizen *et al.*, 2000).

Longtemps utilisée dans le système de rotation culturale, le soja est un légumineuse permettant la reconstitution et l'enrichissement des sols appauvris (N'goran *et al.*, 2011 ; Saïdou *et al.*, 2012). Les légumineuses telles que le soja sont utilisées en agroforesterie, en cultures associées ou en jachères améliorées (Keli *et al.*, 1990). Utilisée dans la rotation culturale il perturbe le cycle de vie de plusieurs pathogène des céréales et manioc (Pandey, 1987). Comme toutes les légumineuses, le soja est capable d'utiliser l'azote de l'air grâce aux nodosités qui se développent sur les racines. Cette capacité à prélever l'azote de l'air, est un avantage très appréciable pour la protection de notre environnement, car permet d'économiser de l'énergie fossile et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. A cette qualité s'ajoute le nombre réduit de traitements chimiques nécessaires pour la protection contre les parasites et les maladies, se prêtant ainsi à la production biologique (Rienke & Joke, 2005).

I.1.6. Ennemis du soja

I.1.6.1. Maladies du soja

I.1.6.1.1. Maladies bactériennes

La principale maladie bactérienne rencontrée chez le soja est la brûlure bactérienne. Elle est causée par *Pseudomonas syringae* pv. *Glycinea*. La plupart du temps, la brûlure bactérienne a une incidence minime. Elle cause toutefois des pertes de rendement et nuit à la qualité des semences quand le temps est frais et pluvieux. Les symptômes se manifestent par l'apparition sur les feuilles des plants infectés de lésions noires ou rouges au pourtour jaune et au centre luisant. Souvent, ils disparaissent en présence de conditions sèches et très chaudes. Les semences infectées présentent des tâches aqueuses, commençant au hile, qui peuvent réduire la viabilité des semences et la germination. La brûlure bactérienne produit un halo jaune distinctif autour des lésions, et les feuilles donnent souvent l'impression d'avoir été déchirées. Les bactéries survivent sur les semences et les résidus de cultures et se propagent aux feuilles supérieures par des éclaboussures de pluie, par le vent et sous l'effet des blessures causées aux plantes (grêle, insectes, blessures mécaniques, etc.) (Anonyme 10, 2009).

I.1.6.1.2. Maladies virales

La mosaïque du soja est la principale maladie virale affectant la culture du soja et est causée par le virus de la mosaïque du soja. Ce virus est capable de survivre d'une saison à l'autre dans les graines infectées et est transmis d'un plant à l'autre par les pucerons. Les feuilles des plants infectés sont déformées, ridées et cloquées. Les plants infectés peuvent être rabougris. Les semences infectées

présentent un brunissement ou un noircissement caractéristique qui produit des bigarrures depuis le hile. On confond souvent les symptômes du virus avec les dommages causés par les herbicides hormonaux. Les plants infectés par le virus de la mosaïque du soja sont répartis de part et d'autre dans le champ, et la zone touchée est habituellement plus petite que s'il s'agissait de dommages causés par un herbicide. Les dommages ne semblent pas se présenter sous une configuration précise dans le champ (Anonyme 10, 2009).

I.1.6.1.3. Maladies fongiques

I.1.6.1.3.1. Anthracnose

Elle est causée par un champignon *Colletotrichum truncatum*. Elle occasionne des pertes de rendement, mais réduit surtout la qualité et la viabilité des graines. Les symptômes les plus caractéristiques de la maladie sont les petits points noirs formés en rangée longitudinale sur les tiges et les gousses en fin de saison. Ce sont des organes de fructification formés par les champignons. L'observation à la loupe de ces points noirs présente des pics, nommés *setae*, il s'agit de l'anthracnose, sinon il s'agit de la brûlure phomopsienne. Elle n'est pas rare sur les graines, par contre, les symptômes sont tout à fait différents. Les graines infectées par l'anthracnose prennent une couleur brun foncée et sont souvent ratatinées (Sylvie, 1999).

I.1.6.1.3.2. Sclérotiniose

La sclérotiniose est actuellement la maladie du soja la plus répandue au Québec. Elle a fait son apparition en 1996 de façon assez brutale et se manifeste chaque année, occasionnant des pertes allant jusqu'à 20 %. La sclérotiniose est une maladie redoutable parce qu'elle s'attaque à toutes les espèces à feuilles larges et parce que le champignon pathogène, *Sclerotinia sclerotiorum*, persiste longtemps (5 ans et plus) dans le sol sous forme de sclérotés. Les sclérotés sont des masses noires très dures qui ressemblent à des crottes de souris et qui permettent au champignon de survivre dans le sol. Ceux qui se retrouvent à la surface du sol ou dans les cinq premiers centimètres peuvent fructifier et produire des apothécies de couleur beige. La fructification survient lorsque le sol reste humide pendant plus d'une dizaine de jours, lorsque les températures sont fraîches (11 à 20 °C) et lorsque le couvert végétal est suffisamment développé pour garder l'humidité relative près du sol très élevée. Les apothécies produisent des spores, des particules invisibles à l'œil nu, qui sont éjectées dans l'air. Ces spores peuvent ainsi atteindre les parties plus fragiles de la plante, soit les fleurs, les gousses avortées ou les blessures, et causer l'infection. Généralement, le site d'infection se situe aux nœuds de la tige qui se trouvent entre 10 et 50 cm au-dessus du sol, rarement au niveau du sol. Le champignon progresse à l'intérieur des tissus jusque dans la tige, bloque le transport de la sève et cause ainsi le flétrissement de la plante. Ce symptôme apparaît généralement au mois d'août, environ

deux semaines après l'infection par les spores, et est visible dans des zones bien délimitées où est distribué à travers tout le champ. Quand on regarde de plus près les plantes flétries, on peut observer de la moisissure blanche sur la tige, ainsi que des sclérotés. (Anonyme 10, 2009).

I.1.6.1.3.3. Rouille du soja

La Rouille du soja est une maladie fongique causée par deux champignons: *Phakopsora pachyrhizi* et *Phakopsora meibomia*. *P. pachyrhizi* est reconnu comme un champignon particulièrement virulent causant des dommages plus importants au soja comparativement à *P.meibomia* dont la virulence est qualifiée de faible. Jusqu'à tout récemment, l'aire de distribution de ce champignon se limitait aux zones tropicales et subtropicales de l'Asie et de l'Australie d'où le nom de « rouille asiatique du soja » assigné à cette maladie (Frédérick *et al.*, 2002 ; Posada-Duitrago & Frederick, 2005 ; Yorinori *et al.*, 2005).

D'après Hibbett *et al.* (2007), *P. pachyrhizi* est un champignon obligatoire appartenant à:

Phylum : Basidiomycota

Classe : Urédiniomycètes

Ordre : Urédinales

Famille : des Melampsoraceae (Phakopsoraceae)

P. pachyrhizi est observé pour la première fois au Japon en 1902 (Park *et al.*, 2007). par la suite dans le continent Américain. En 1994, il fait son apparition à Hawaï et en 1996 il est rapporté pour la première fois en Uganda et dans le continent africain (levy, 2005). En 2001 il a été rapporté au Paraguay et au Brésil ; et en 2002 en Argentine (Rossi, 2003). En 2004 il s'est rependu en Colombie, équateur et au Etat Unis (Pan *et al.*, 2006).

I.1.6.1.3.3.1. Symptômes

Les symptômes les plus courants sont de petites lésions de couleur chamois à brun foncé ou de couleur brun-roux, de 2-3 mm de diamètre. Ces lésions apparaissent le plus souvent sur le dessous des feuilles, mais se manifestent également sur les pétioles, les gousses et les tiges. Elles forment des pustules où sont produites les spores. Les lésions de couleur chamois produisent davantage de spores que les lésions de couleur brun-roux. Les feuilles infectées ont une apparence tachetée (Fig.1.). L'infection se déclare souvent sur les feuilles inférieures et monte le long du plant. Les feuilles finissent par jaunir et tomber (Anonyme 10, 2009). D'après Ploper (2004), les petites lésions de couleur chamois à brun foncé ou de couleur brun-roux, possèdent approximativement 1 mm de diamètre. La perte de tissus photosynthétique, la défoliation prématurée et la mort peuvent

grandement diminuer les rendements allant jusqu'à 90 % (Ricardo, 2014). Au niveau des gousses, la rouille empêche la maturation des graines. La rouille asiatique du soja peut être facilement confondue avec les taches brunes (*Septoria* sp.), le mildiou (*Peronospora manshurica*) ou la brûlure bactérienne (*Xanthomonas* sp) (Teran *et al.*, 2007).



Fig. 2. Symptômes de la rouille asiatique du soja (Rupe & Sconyers 2008)

I.1.6.1.3.3.2. Cycle de développement de *phakopsora pachyrhizi*

La germination des spores se produit 12 à 14 heures de rosée (minimum de 3 à 6 heures) et forme un appressorium devant servir à la formation d'un hyphe qui pénétrera les cellules épidermales, causant leur effondrement. La pénétration se produit environ 6 heures à des températures entre 10 et 28 °C, avec un optimum de 22 °C (Marchetti *et al.*, 1976 ; Ploper & Devani, 2002). Les hyphes se développent dans l'espace inter-cellulaire et forment ultimement un haustorium à l'intérieur d'une cellule du mésophylle. L'urédie est ensuite formée sur la face inférieure de la feuille, au sein de laquelle aura lieu la sporulation (Koch *et al.*, 1983). Les symptômes de la rouille apparaîtront environ quatre jours après suivant l'inoculation, sur les feuilles trifoliées situées à la base du plant (Dorrance *et al.*, 2007). Une pustule de forme conique est alors visible sur la face inférieure de la feuille et finira par se briser pour libérer les urédospores qui se sont développées à l'intérieur (Sweets *et al.*, 2004). La maturation des urédospores ont lieux entre 6 et 7 jours après l'infection. La Libération des spores se produit après 7 à 10 jours (condition qui est favorisée par le vent). Une partie de cet inoculum est déposée sur la surface d'un tissu hôte pour recommencer le cycle (Fig.2.). Une pustule peut produire des spores jusqu'à trois semaines (Teran *et al.*, 2007). Des températures élevées et bas pourcentages d'humidité, inhibent le développement de la maladie (Ploper & Devani, 2002).

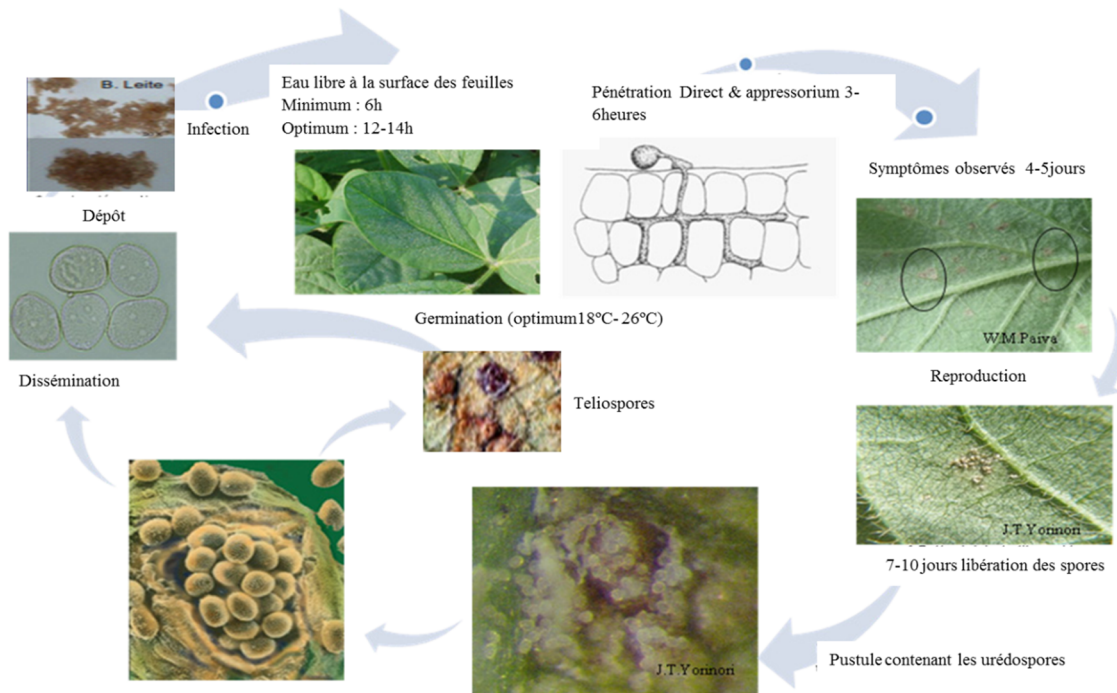


Fig. 3. Cycle de développement du pathogène (Dorrance *et al.*, 2007).

I.1.6.1.3.3.3. Epidémiologie

Les températures optimales pour le développement de la rouille du soja se situent entre 15 et 28 °C. Au-dessus de 29 °C et sous des conditions sèches, la progression de la maladie est ralentie. Une humidité élevée, la pluie et la rosée favorisent une progression rapide de la rouille. L'infection prend place, s'il y a présence d'une période prolongée d'humidité sur le feuillage d'un minimum de 6 heures. L'infection sera maximale si la mouillure du feuillage est de 10 à 12 heures. À la suite de l'infection, les urédies se forment à l'intérieur de 5 à 8 jours. Quant aux urédospores, elles apparaissent 9 jours après l'infection. Les urédiospores seront produites en quantité considérable sur les plantes infectées. Elles sont dispersées par le vent et servent à initier de nouvelles infections sur des plantes saines. *P. pachyrhizi* est un parasite obligatoire ce qui signifie que ce champignon a besoin d'un tissu végétal vivant pour sa croissance, sa production d'urédiospores et sa survie. Ce champignon ne survit pas dans le sol et la transmission par la semence n'est pas documentée (Goellner *et al.*, 2010).

I.2. Mécanismes de défense naturelle de la plante

Les mécanismes de défense sont l'ensemble des processus efficaces mis en place par la plante et susceptibles de stopper son envahissement par les pathogènes. Le pathogène développe des stratégies offensives pour envahir la plante qui, en retour, déploie des mécanismes afin de retarder ou d'empêcher la progression et la multiplication du pathogène (Zhao *et al.*, 2005). Les plantes n'ont pas de cellules de défense mobiles ou de système immunitaire adaptatif comme chez les mammifères, de

sorte qu'ils s'appuient sur le système immunitaire inné et les signaux systémiques à partir des cellules infectés, où chaque cellule végétale individuelle peut initier de manière autonome un mécanisme de défense (Chisholm *et al.*, 2006). À la suite d'une infection, les plantes déclenchent un remaniement rapide de l'expression des gènes afin de moduler certaines voies métaboliques et d'induire des réponses de défense appropriées (El Oirdi *et al.*, 2011).

I.2.1. Mécanismes de défense induite

Les mécanismes de défense induits chez le végétal se caractérisent par un bouleversement du métabolisme. On note ainsi la synthèse ou l'augmentation de la synthèse de molécules constitutives ou non de la plante, pouvant entraîner des modifications morphologiques visant essentiellement à empêcher ou stopper la colonisation du pathogène. Plusieurs mécanismes de défense sont mis en place au moment de l'infection ou de l'élicitation. On note ainsi :

- une réaction d'hypersensibilité ;
- un renforcement de la paroi qui constitue une des premières étapes de lutte contre les agressions. Une modification de cette paroi qui limite la progression de l'agresseur ;
- l'induction des voies de synthèse des métabolites secondaires ;
- l'accumulation de protéines PR.

I.2.1.1. Réaction d'hypersensible

La réaction d'hypersensibilité (RH) est un mécanisme particulier de résistance mis en place en réponse aux agressions des agents pathogènes. Elle est basée sur le concept « gène pour gène », dans laquelle le produit du gène d'avirulence du pathogène est reconnu par le produit du gène de résistance de la plante (Klarzynski & Fritig, 2001). Elle se traduit par l'apparition de nécrose des tissus végétaux autour du site d'infection. Cette nécrose, due à la mort de quelques cellules végétales entourant les cellules infectées, induit une résistance locale, qui se manifeste généralement autour de la zone où la RH s'est produite (Sansregret *et al.*, 2015). C'est une zone particulière où la mise en place de la résistance est très forte (Sansregret *et al.*, 2015). Il s'ensuit la synthèse de molécules de défense antimicrobienne à action directe ou indirecte (Meteignier *et al.*, 2015). Ces premières lignes de défense sont très efficaces pour confiner le pathogène et retarder son invasion dans l'organisme. La propagation des signaux et la synthèse des molécules de défense peuvent se généraliser à la plante entière : il s'agit de la résistance systémique acquise (SAR). Ce type de résistance est certes moins intense mais plus durable : la plante est préparée à une nouvelle attaque du pathogène ou d'un autre agresseur et pourra y répondre plus rapidement (KAUFFMANN *et al.*, 2001). L'induction de cette

réaction hypersensible est caractérisée par trois phases successives : reconnaissance, signalisation puis expression des réponses de défense (Fig.4)

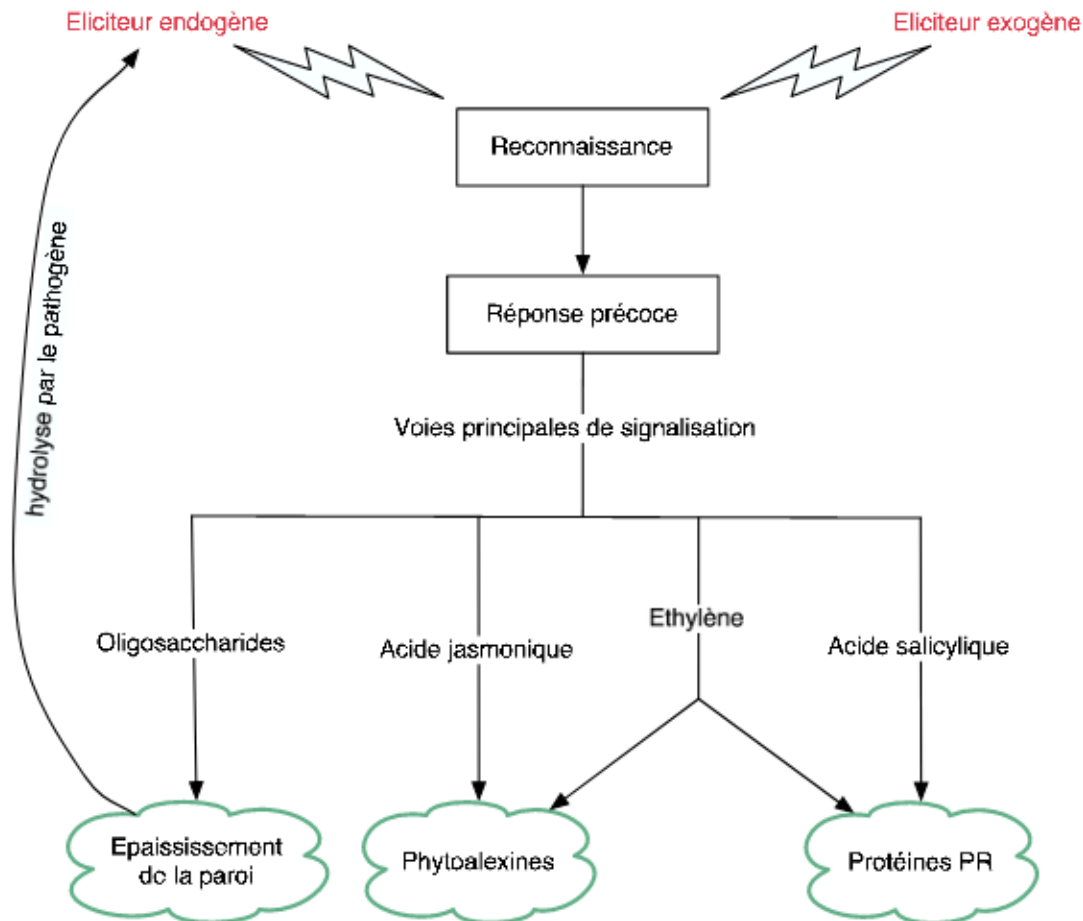


Fig. 4. Principaux mécanismes de défense des plantes (Antoine & flora 2005)

Les mécanismes moléculaires de cette mort hypersensible ne sont pas connus. Cependant, de nombreux travaux suggèrent que cette réaction est une mort cellulaire génétiquement programmée (Greenberg, 1997).

1.2.1.2. Renforcement de la paroi cellulaire

La paroi cellulaire est une barrière physique naturelle très efficace face aux agresseurs qui synthétisent des enzymes et composés capables de la dégrader. Lors d'une infection par un agent pathogène cette paroi va être renforcée par des dépôts de composés phénoliques (lignines), d'esters tels que la subérine, de polysaccharides tels que la callose et par l'accumulation de glycoprotéines riches en hydroxyproline (HRGP). L'accumulation de lignine en réponse à l'infection a été décrite chez diverses plantes (Messner & Boll, 1993). La lignine est un polymère phénolique, insoluble et

très résistant aux enzymes de la dégradation de la paroi sécrétées par les agents pathogènes. D'autres macromolécules interviennent aussi dans le renforcement de la paroi : il s'agit des protéines riches en hydroxyproline (HRGP). Elles s'accumulent lors de l'infection, parallèlement à l'augmentation de la résistance (Benhamou, 1996). Ce sont des protéines qui forment un réseau serré, empêchant ainsi la pénétration du pathogène, et possèdent aussi la propriété d'agglutiner les bactéries réduisant ainsi leur mobilité.

I.2.1.3. Voies des métabolites secondaires

Les plantes à la suite d'une attaque par un pathogène peuvent stopper ou ralentir l'infection par accumulation constitutive ou inductible de métabolites secondaires antimicrobiens et / ou cellulaires (La Camera *et al.*, 2004 ; Vogt, 2010). Parmi ces métabolites, on distingue ceux dits primaires (lipides, protéines, glucides) participant aux fonctions cellulaires et ceux dits secondaires, dont la contribution au fonctionnement cellulaire ou au développement des plantes serait insignifiante. La classification de ces métabolites secondaires offre trois catégories à savoir les alcaloïdes (composés azotés), les composés phénoliques et les terpénoïdes. A cette classification s'ajoute la catégorie des hétérosides ou glycosides, composés de quatre familles dont les hétérosides cyanogènes, les glucosinolates, les saponosides et les hétérosides cardiotoniques. Différentes voies de biosynthèse de ces métabolites sont impliquées dans la mise en place des processus de défense contre les agents pathogènes chez les plantes supérieures. Les enzymes qui participent à ces synthèses sont induites lors de l'interaction avec l'agent pathogène ou en réponse à l'application d'éliciteurs. Les hétérosides cyanogènes ou glycosides cyanogènes ou encore substances cyanogènes sont les dérivés d'acides aminés capables de libérer l'acide cyanhydrique suite aux actions successives de deux enzymes : la β -glucosidase qui libère la fraction glucosique et une hydroxynitrile lyase qui libère l'acide cyanhydrique (toxique) (Chapman & Hall, 1973).

En ce qui concerne les plantes affectées par des rouilles, les mécanismes de défense varient d'une plante à l'autre. Dans le cas de *Phaseolus vulgaris* inoculé par *Uromyces vigna* Barcl., la teneur élevée en composés phénoliques associés aux parois est responsable de l'arrêt de la croissance du champignon (Heath & Stumpf, 1986), tout comme peut l'être une déficience en éléments nutritifs chez *Vigna sinensis*, infecté par *U. phaseoli* var. *vignae* (Heath, 1972). Trois phytoalexines, les avénaluminés (I, II, III) s'accumulent dans le cas des interactions incompatibles entre l'Avoine et *Puccinia coronata* f.sp. *avenae* (Mayama *et al.*, 1982). Des études très détaillées menées par Leath et Rowell (1966, 1969 et 1970) sur des interactions identiques entre le Maïs et *Puccinia graminis*, suggèrent l'intervention d'une phytoalexine (non identifiée) comme facteur de résistance. Par ailleurs, Keen (1979) constate que la production de deux nouveaux composés fongitoxiques, l'alcool et

l'aldéhyde coniférylique, peut être considérée comme un mécanisme de résistance chez le Lin attaqué par *Melampsora lini*. Dans le cas de la plante de soja, elle répond à l'infection par synthèse des isoflavonoïdes (daïdzéine, la génistéine) qui s'accumulent dans les génotypes de soja résistants et sensibles à la suite d'une infection à *P. pachyrhizi* (Lygin *et al.*, 2009). On note entre autres la Glyceoline qui est une phytoalexine dont sa concentration augmente à la suite de l'infection par *P. pachyrhizi* (Lygin *et al.*, 2009). D'après le même auteur l'accumulation de la Glyceoline réduit efficacement la germination des urédospores de *P. pachyrhizi* in vitro.

I.2.1.3.1. Composés phénoliques

Les composés phénoliques sont les métabolites secondaires largement distribués dans le règne végétal. Ils constituent l'un des groupes des composés les plus importants et les plus diversifiés du métabolisme secondaire des végétaux supérieurs (Katz, 1998). Ce sont des substances connues pour leur potentiel antifongique et antimicrobien (Boudjeko *et al.*, 2007; Djocgoue *et al.*, 2011; Simo *et al.*, 2014). Ces métabolites de structures variées, sont composés des flavonoïdes, des tannins et les phytoalexines impliquées dans la résistance (Dixon *et al.*, 1983). Dans la cellule, ces composés existent sous trois formes: les monomères (acides férulique, acides caféiques, acides coumariques etc...); les dimères tels que l'acide dehydrodiférulique et les polymères tels la lignine et la subérine. Plusieurs auteurs ont établi que les composés phénoliques peuvent servir de marqueurs de résistance dans l'interaction hôte/parasite (Djocgoué, 1998). De manière générale, les composés phénoliques s'accumulent toujours dans les tissus infectés et interviennent à différents niveaux dans la relation parasitaire. Parmi les composés phénoliques qui sont induits chez les plantes après une élicitation ou par une attaque pathogène, on trouve les composés phénoliques autofluorescents (Bennett *et al.*, 1996). Ces métabolites, qui autofluorescent après excitation dans l'ultra violet, sont activement synthétisés autour des zones de pénétration des pathogènes (Bennet *et al.*, 1996; McLusky *et al.*, 1999).

I.2.1.3.1.1 Flavonoïdes

Les flavonoïdes sont des molécules polysubstituées ubiquitaires chez les plantes, formés à partir des acides aminés aromatiques phénylalanine, tyrosine et du malonate. La structure de base de flavonoïde est le noyau flavane, qui se compose de 15 atomes de carbone disposés en trois cycles (C6-C3-C6) qui sont nommés cycle A, cycle B et cycle C (Stalikas, 2007). Les flavonoïdes sont responsables de la coloration des fleurs (Hahlbrock et Scheel, 1989), intervient dans le processus de défense contre les radiations ultraviolettes, les herbivores et les attaques microbiennes (Lichtenthaler et Schweiger, 1998). Certains d'entre eux jouent également un rôle de phytoalexines, cest –à-dire de

métabolites que la plante synthétise en grande quantité qui sont impliquées dans la résistance contre les pathogènes (Dixon *et al.*, 1983).

I.2.1.3.1.2. Tannins

Les tannins sont des polyphénols, amer astringents (qui font froncer la bouche) le plus souvent hydrosolubles. D'origine végétale ils possèdent la capacité de précipiter les protéines, alcaloïdes et polysaccharides, à partir de leur solution aqueuse. Disposés dans les vacuoles et les parois cellulaires, ils représentent moins de 1 % du poids sec des plantes. On distingue deux grands groupes: les tannins condensés et les tannins hydrolysables. Les tannins condensés sont des flavonoïdes oligomères ou polymères, également connus sous le nom de proanthocyanidines (Abdul *et al.*, 2012). Les tannins hydrolysables sont des phénols liée à un résidu sucré par les liens ester. Ces tannins jouent un rôle protecteur contre les prédateurs et les forts éclaircissements. (Barbehenn & Peter 2011).

I.2.1.4. Protéines PR

Les protéines PR représentent un ensemble de protéines dont la production est fortement induite lors de l'infection (Fritig *et al.*, 1998). Elles ont été identifiées chez de nombreuses espèces végétales après infection par différents pathogènes mais aussi dans d'autres situations de stress (Kaltenbach *et al.*, 1997). Elles sont stables à pH acide et très résistantes à l'action des protéases produites par la plante elle-même ou par les micro-organismes pathogènes. Ces deux propriétés confèrent aux protéines PR une grande stabilité dans les environnements défavorables où elles s'accumulent, notamment dans les vacuoles, et les espaces intercellulaires occupés par les pathogènes. Ces protéines sont supposées interagir directement avec des composés structuraux ou des enzymes impliquées dans le pouvoir pathogène de l'agresseur. Certaines sont des glycosides hydrolases comme les chitinases et les glucanases. Ces protéines sont capables de dégrader la paroi des champignons et des bactéries, libérant ainsi des petits fragments de chitine et de glucane. Ces oligosaccharides constituent alors des éliciteurs hétérologues des réactions de défense chez les plantes (Legrand *et al.*, 1987 ; Kauffmann *et al.*, 1987 ; Ponstein *et al.*, 1994). D'autres protéines PR ont des activités antifongiques en interagissant avec la membrane plasmique du pathogène (Abad *et al.*, 1996). Certaines sont des peroxydases qui interviennent dans l'insolubilisation des protéines et des composés phénoliques permettant ainsi le renforcement de la paroi (Fritig *et al.*, 1998). Les agents pathogènes sécrètent des protéases et des polygalacturonases qui dégradent la paroi des végétaux. La plante lutte contre ces facteurs d'agressivité en synthétisant des inhibiteurs de protéases et de polygalacturonases (Ryan, 1990). Les polygalacturonases dégradent les pectines de la paroi végétale et libèrent ainsi des mono et des disaccharides. Les inhibiteurs de polygalacturonases

synthétisés par la plante diminuent l'activité de cette enzyme et favorisent ainsi la synthèse des fragments oligosaccharidiques qui ont un degré de polymérisation plus élevé. Ces oligosaccharides possèdent une activité élicitrice des réactions de défense (De Lorenzo et Cervone, 1997). Ces protéines PR sont fortement synthétisées au niveau des cellules entourant les lésions nécrotiques (Fritig *et al.*, 1998).

I.2.1.4.1. β (1,3) glucanases

Les β (1,3) glucanases (EC. 3.2.1.39) sont des enzymes dont la synthèse est induite par de nombreux pathogènes. Ce sont les protéines les plus connues et les plus étudiées du groupe des protéines PRs. Les β (1,3) glucanases hydrolysent la β (1,3) glucane (Pegg, 1977), un homopolymère de glucose et constituant de la paroi de nombreux pathogènes. Les β (1,3) glucanases constituent la famille des PR-2 protéines. L'implication des β (1,3) glucanases dans les mécanismes de défense des plantes se situe à deux niveaux. Elles peuvent agir directement sur les microorganismes en détruisant leur paroi (Mauch *et al.*, 1988) ou indirectement par libération des éliciteurs exogènes (Boller, 1988).

I.2.1.4.2. Peroxydases

Dans les processus de croissance, les peroxydases contrôlent le niveau d'auxine endogène par leur action sur l'acide 3-indole acétique (Kim *et al.*, 1989). En dégradant l'AIA, elles participent au contrôle de la croissance apicale des plantes (Gaspar *et al.*, 1996). De même, Djiana *et al.*, (1996) ont identifié deux peroxydases cationiques impliquées dans l'inhibition de la croissance des cellules de lin par la lumière. Les peroxydases interviennent dans la biosynthèse de l'éthylène, de la subérine et la lignification des parois. Les peroxydases ont très souvent été utilisées comme marqueurs biochimiques de résistance et de tolérance aux stress biotiques et abiotiques. Une forte augmentation du taux de peroxydase a été observée dans les tissus infectés (Asada, 1992). Elles sont impliquées dans les processus de cicatrisation par la subérisation et la lignification des tissus à la suite d'une blessure (Mohan et Kolattukudy, 1990). Les peroxydases induisent une barrière physique par polymérisation des monolignols, la réticulation des pectines et des protéines structurales, et par formation de la subérine, tout en assurant une défense chimique de la plante par production d'H₂O₂ ou par oxydation des phénols en quinones, produits très toxiques. Elles sont aussi impliquées dans la synthèse des phytoalexines (Kerby et Somerville, 1992). Leur action dans la rigidification des parois cellulaires permet à celles-ci d'être moins sensibles aux enzymes lytiques des parasites.

I.2.1.4.3. Polyphenol oxydase (PPO)

Le polyphénol oxydase est une enzyme qui a la particularité de réduire une molécule d'oxygène. Elle a une double activité: une activité diphénolase (EC 1.10.3.2) et une activité monophénolase (EC 1.14.18.1) (Steffens *et al.*, 1994). L'activité diphénolase catalyse l'oxydation des

o-diphénols en o-quinones et l'activité monophénolase catalyse l'hydroxylation des monophénols en o-diphénols. Les fruits contiennent généralement des teneurs élevées de PPO (Macheix *et al.*, 1990). Ces enzymes sont fortement impliquées dans le brunissement des fruits et des tissus (Belluci *et al.*, 1999). Par leur action dans la production des quinones, les PPO font parti des armes défensives des plantes vis à vis des agents pathogènes et des stress abiotiques et sont généralement considérés comme des marqueurs biochimiques de résistance (Joanna *et al.*, 1999; Constabel *et al.*, 2000). En effet, les quinones sont des composés plus toxiques que leurs précurseurs. Ils sont toxiques aux agents pathogènes mais pourraient également être associés à la réaction hypersensible.

I.3. Interaction entre isolat de *Phakopsora pachyrhizi* / *Glycine max*

I.3.1. Interaction incompatible

L'interaction incompatible correspond à une incapacité de l'agent pathogène à infester la plante. Cette incapacité peut être due à la présence de barrières physiques (cuticule, paroi végétale) et /ou chimiques (composés antimicrobiens) (EL Mnouchi, 2015).

I.3.2. Interaction compatible

Elle correspond à une capacité de l'agent pathogène à infecter la plante. Elle commence par une reconnaissance du pathogène par la plante avec l'intervention de différentes molécules préexistantes. Ensuite, au point d'entrée de l'agresseur, les cellules s'autodétruisent pour limiter la progression du pathogène par la réaction d'hypersensibilité. A l'intérieur de la plante trois types de stratégies sont mises en œuvre à savoir épaissement des parois cellulaires, la production de phytoalexine et la synthèse des protéines de défense (protéines PR).

L'inoculation de plants de soja (*Glycine max*) avec *P. pachyrhizi*, provoque une réponse biphasique caractérisée par une poussée d'expression différentielle des gènes dans les 12 premières heures. Une période de repos se produit de 24 à 48 h après l'inoculation, au cours desquelles *P. pachyrhizi* continue à se développer mais ne provoque pas de fortes réponses de l'hôte, suivies d'une deuxième phase d'expression génique intense (Schneider *et al.*, 2011). L'interaction entre les génotypes de soja et les isolats de *P. pachyrhizi* suit la théorie de la relation gène pour gène. A un gène d'avirulence correspond un gène de résistance à un pathotype (Hartman *et al.*, 2011). D'après Arianne *et al.* (2011), 15 millions de séquences correspondant à des gènes de soja ont été identifiés après infection. Quarante-deux (42) % des gènes étaient régulés à la baisse, notamment les gènes codant pour des protéines impliquées dans le métabolisme des acides aminés. 31 % étaient régulés à la hausse, notamment les gènes codant pour des protéines impliquées dans le métabolisme des lipides, la biosynthèse des glycanes et la transduction des signaux. Des changements ont été identifiés dans l'expression génétique des enzymes impliquées dans plusieurs voies de biosynthèse des acides

aminés. La voie du métabolisme de l'arginine et de la proline est l'une des plus peuplées avec 30 gènes identifiés (Fig 4). Ces 30 gènes codent pour 16 enzymes différentes. Parmi ces gènes, 13 étaient clairement régulés à la baisse, comme indiqué en rouge, tandis que quatre étaient clairement régulés à la hausse et sont colorés en vert (Fig.5). En général, les gènes régulés à la hausse étaient associés à la défense de base, tandis que les gènes régulés à la baisse étaient associés à de nombreuses voies métaboliques.

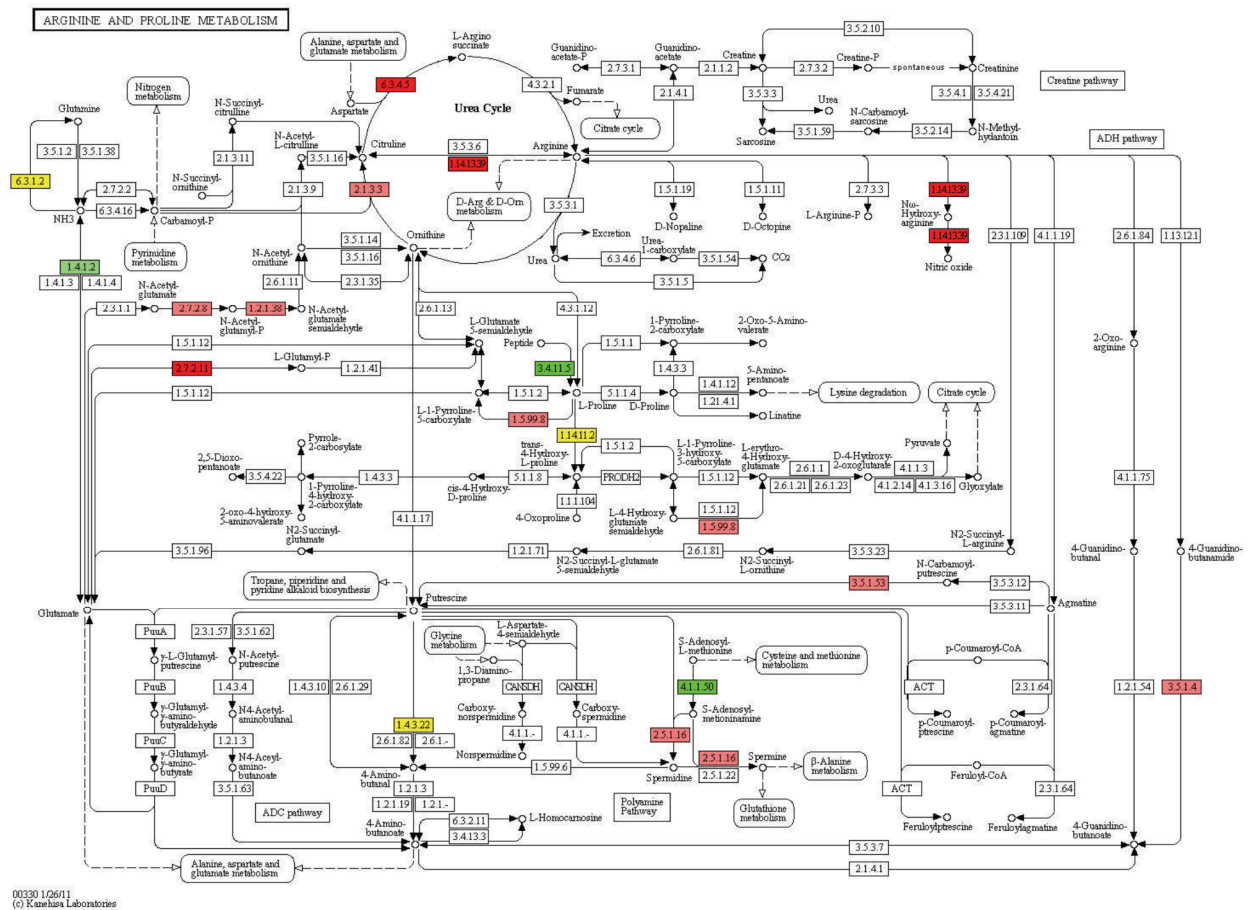


Fig. 5. Niveau d'expression des gènes codant pour des enzymes impliquées dans le métabolisme de l'arginine et de la proline (Arianne *et al.*, 2011).

De plus, des gènes de résistance à des pathotypes spécifiques tels que Rpp1, Rpp2, Rpp3, Rpp4 et Rpp5, ont été trouvés dans un certain nombre d'espèces pérennes de *Glycine* (Garcia *et al.*, 2008). Des gènes dominants monogéniques contrôlant la résistance spécifique à un pathotype de la rouille du soja ont été identifiés et cartographiés sur cinq loci dans le génome du soja, avec des allèles multiples sur quatre loci (Burdon, 1988 ; Jarosz & Burdon, 1990). De même l'étude génomique font état de 182 WRKY gènes et 32 pseudogènes identifiés qui sont impliqués dans la réponse à l'infection chez certains génotypes de soja après infection (Bencke-Marta *et al.*, 2014). L'interaction hôte-rouille chez plusieurs espèces pérennes de *Glycine*, suggère que les gènes de résistance et de

rouille Avr interagissaient les uns avec les autres (Burdon, 1984). Outre les espèces de *Glycine*, des interactions hôte-rouille ont été observées chez le kudzu (Bonde *et al.*, 2009), *Vigna adenantha* (Slaminko *et al.*, 2008) et *Phaseolus vulgaris* (Miles *et al.*, 2007).

I.4. moyens de lutte contre la rouille asiatique du soja

I.4.1. Lutte culturale

Il s'agit de l'ensemble des méthodes culturales permettant de créer des conditions défavorables au développement de l'agent pathogène ou de diminuer la pression de l'inoculum. En effet, ces mesures consistent d'une part à débarrasser la plantation en début de campagne, des restes de la campagne précédente; D'autre part, des pratiques culturales visant à aérer suffisamment la plantation et à réduire l'hygrométrie ambiante par l'entretien fréquent et le réglage de l'ombrage. La rotation des cultures avec du maïs et des céréales à paille peut aider à minimiser l'effet des maladies. Des pratiques culturales comme la destruction d'hôtes alternatifs, l'irrigation en temps opportun, la plantation précoce et la croissance des cultivars à maturation précoce peuvent également réduire l'incidence de la maladie (Akinsanmi *et al.*, 2001; Caldwell *et al.*, 2002 ; Twizeyimana *et al.*, 2011).

I.4.2. Lutte chimique

La lutte chimique, est la méthode la plus efficace pour lutter contre les maladies. l'utilisation des fongicides de plusieurs classes possédant différents modes d'action pour lutter contre la rouille asiatique est la méthode la plus efficace (Hartman *et al.*, 2005 ; Miles *et al.*, 2007). Leur efficacité dépend toutefois du moment de l'application et de la pression de la maladie (Mueller *et al.*, 2009). Le retardement de l'application après l'établissement de la maladie entraîne des rendements incohérents (Miles *et al.*, 2003). L'utilisation massive de fongicides systémiques ou de contact (*triazole*, *strobilurin*) conduit à sélectionner des isolats résistants à ces matières actives (*trifloxystrobine*) (Murthi *et al.*, 2017). De plus, les coûts élevés, les effets nocifs de l'emploi des pesticides sur la santé des utilisateurs et sur l'environnement amènent aujourd'hui à rechercher des alternatives efficaces, efficientes et durables.

I.4.3. Lutte génétique

C'est une méthode de lutte qui repose sur la sélection des génotypes présentant un niveau élevé de résistance et/ou de tolérance aux maladies et ravageurs. L'alternative à l'utilisation des fongicides est la lutte génétique. De nombreux programmes reposant sur l'introduction de gènes de résistance ont été engagés, avec pour but la sélection de variétés ayant une bonne valeur agronomique et une bonne résistance à la rouille asiatique du soja. Ces programmes se sont longtemps basés sur l'introduction de résistances spécifiques, à caractère monogénique. Actuellement, 6 de ces gènes

(Rpp1, Rpp2, Rpp3, Rpp4, Rpp5 et Rpp6) ont été identifiés chez certains génotypes de soja (Garcia *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2012). Cette résistance basée sur un gène a été rapidement contournée par le pathogène au vue de sa nature polycyclique. Egalement, l'émergence des pathotypes nouveaux résultant de la pression de sélection rend ainsi difficile le développement des variétés a résistance durable (Murithi *et al.*, 2017).

I.4.4. Lutte biologique

C'est une méthode de lutte au moyen d'organismes vivants antagonistes, appelés agents de lutte biologique. Elle consiste en l'exploitation de relation hétérospécifique existant entre êtres vivants animaux et végétaux telles que la prédation, le parasitisme, la compétition, l'antibiose, sans faire appel à des pesticides chimiques. Elle a pour but de maintenir les populations d'organismes bioagresseurs en dessous d'un seuil de nuisibilité (Silatsa, 2006). Ces agents naturels sont réunis sous le concept de biopesticides. Leur disparition pourrait, en effet engendrer un déséquilibre qui favoriserait l'apparition ou la réapparition de certains pathogènes. Plusieurs extraits de plantes (Ambang *et al.*, 2010 ; Dooh *et al.*, 2014, Mboussi *et al.*, 2016 ; Ndogho *et al.*, 2018 ; Dongmo *et al.*, 2020 ; Charles *et al.*, 2021) et de microorganismes du sol (Rahman *et al.*, 2007 ; Camps *et al.*, 2012 ; Tchameni *et al.*, 2012 ; Ismail *et al.*, 2013 ; Rakotoarimanga *et al.*, 2014 ; Antoine *et al.*, 2015 ; Kerroum, 2019) ont été utilisés pour lutter contre les maladies des plantes.

I.5. GENERALITES SUR LES SYMBIOSES

I.5.1. Symbioses rhizobia-légumineuses

La symbiose rhizobia/légumineuse est un processus indispensable à la plante pour acquérir l'azote sous forme réduite, mais aussi aux rhizobia pour obtenir les nutriments nécessaires à leur développement (Raven *et al.*, 2000). Dans les associations symbiotiques, la plante représente l'hôte et le partenaire bactérien le symbionte. Chez les légumineuses, les rhizobia s'installent dans les racines des plantes. Le végétal fournit des matières nutritives à la bactérie et celle-ci capte l'azote de l'air et le donne à son hôte (Pousset, 2003).

I.5.1.1. Etablissement de la symbiose rhizobia-légumineuses

Dans la rhizosphère, les racines végétales synthétisent des molécules qui sont généralement des flavonoïdes et des acides aminés (opines, octropines...) qui stimulent la multiplication des bactéries fixatrices d'azote (Rhizobia) dénommées actuellement bactéries nodulant les Légumineuses (BNL) ; ces molécules attirent ces bactéries vers les poils absorbants des racines. Au contact bactéries-racines, il s'effectue une reconnaissance entre les molécules de la racine et celles de la bactérie appelée "*dialogue moléculaire*" à travers l'interaction polysaccharides bactériens et lectines des légumineuses. C'est à ce niveau que se réalise la spécificité BNLespèce de Légumineuse. A

l'issue de ce dialogue, il y a compatibilité Ou non entre les rhizobia et la racine de la légumineuse. Chez certaines espèces de légumineuses, les rhizobia entrent par les blessures ou ouvertures (groupe de l'arachide) ; mais chez la plupart, cela s'effectue à travers le poil absorbant qui s'incurve ; il se développe ensuite un "cordon d'infection" dans lequel évoluent les bactéries dans la racine. Vers les tissus des racines, dans les cellules, les rhizobia se différencient (augmentation de volume et polyploïdisation) et entraîne des modifications morphologiques et physiologiques des rhizobia et une énorme augmentation de la taille des cellules de la racine qui s'hypertrophient, se différencient pour former les nodules. (Duhoux *et al.*, 2004) (Fig.6).

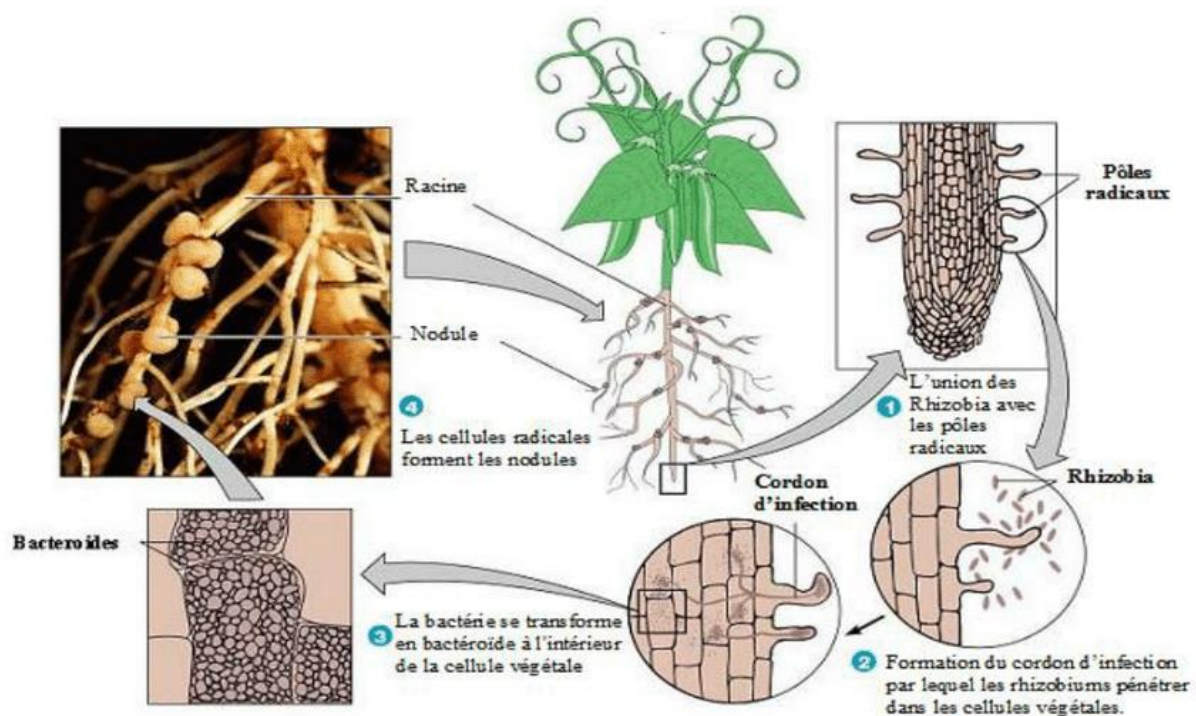


Fig. 6 . Différentes étapes de l'établissement de la symbiose rhizobia-légumineuse (Tortora *et al.*, 2003).

I.5.1. 2. Les rhizobia

I.5.1. 2. 1. Caractères morphologiques

C'est un groupe de bactéries capable d'établir des associations symbiotiques avec beaucoup de légumineuses et quelques espèces non légumineuses. Le trait le plus important est leur capacité de former des nodules sur les racines (ou parfois sur la tige) dans lesquelles la fixation d'azote atmosphérique (N₂) a lieu (Pelmont, 1995).

Les rhizobia sont des bactéries Gram négatifs, non sporulantes, on distingue deux formes ; la forme végétative : les bactéries sont mobiles par un seul flagelle polaire ou par deux à six flagelles et apparaissent sous forme de bâtonnets réguliers de 0,5 à 0,9 µm de largeur 1,2 à 3 µm de longueur (Somasegaran et Hoben, 1994). Pour les rhizobia à croissance rapide, les cellules sont mobiles par 2-6 flagelles. Celles à croissance lente sont mobiles par un seul flagelle polaire ou un flagelle

subpolaire (Somasegaran et Hoben, 1994). La forme bactéroïde : à l'intérieur des cellules cortex racinaire, les rhizobia se transforment en bactéroïdes de forme branchée, sphérique ou en massue (Perry *et al.*, 2004). Il existe des bactéroïdes réguliers et irréguliers. Chez les groupes *Rhizobium trifoli*, *Rhizobium meliloti*, et *rhizobium leguminosarium*, les individus sont irréguliers et ont une taille à peu près dix fois plus grande que ceux de la forme végétative. (Somasegaran et Hoben, 1994).

I.5.1.2. 2. Caractères biochimiques

Les rhizobia sont des bactéries chimioorganotrophes, ils utilisent les carbohydrates relativement simples comme le glucose, le mannitol, le saccharose et des composés aminés. Certaines espèces exigent des vitamines pour leurs croissances (Somasegaran et Hoben, 1994). Les rhizobia à croissance rapide peuvent croître dans une large gamme de carbohydrates, mais ils ont une meilleure croissance dans du glucose, le mannitol ou le saccharose. La majorité des souches à croissance lente préfère le pentose (Somasegaran et Hoben, 1994). Les rhizobia n'assimilent pas l'azote en dehors de la plante et ont besoin d'une source d'azote ammoniacale ou aminé pour se développer à l'état libre (Pelmont, 1995).

I.5.1.2. 3. Caractères physiologiques

Les rhizobia sont des microorganismes aérobies ou micro-aérophiles et peuvent se contenter d'une faible tension en oxygène (pression de 0,01 atm). Le pH optimum de la croissance se situe entre 6 et 7, plus exactement 6, 8, mais certaines souches tolèrent un milieu acide (pH 4) comme *rhizobium japonicum*. La température idéale se situe 25-30°C (Somasegaran et Hoben, 1994).

I.5.1.2. 4. Caractères cultureux

Le yeast mannitol agar (YMA) est un des milieux solides, les plus utilisés pour la culture de rhizobia (Vincent, 1970). Sur ce milieu les colonies apparaissent sous forme circulaire, blanche, opaque ou laiteuses, humides, translucides, elles peuvent être brillantes. Les colonies jaunes sont pâles rencontrées surtout dans les cultures âgées (Somasegaran et Hoben, 1994). Il est admis que seules les bactéries correspondant aux bactéries non différenciées en bactéroïdes sont capables de pousser sur boîte de Pétri (Boivin-Masson *et al.*, 2006).

I.5.1.3. Classification des rhizobia

La combinaison d'études polyphasiques et phylogénétiques a permis de modifier considérablement la taxonomie des rhizobia ces dernières années (Tableau I). Au total, 98 espèces de rhizobia reparties en 13 genres et appartenant aux sous-classes alpha (10 genres) et beta (2 genres) des protéobactéries ont été identifiées depuis 2013 (NOEL, 2013). Ces espèces se répartissent également en huit familles (Rhizobiacées, Phyllobactériacées, Bradyrhizobiacées, Hyphomicrobiacées, Méthylobactériacées, Brucellacées, Burkholderiacées et Ralstoniacées) et deux

ordres, à savoir les rhizobiales et les burkholderiales. L'ordre des rhizobiales renferme les six premières familles.

Tableau I. Les derniers remaniements de la classification des rhizobia selon Weir, 22 Février 2014 (Berrada et Benbrahim, 2014).

	Espèces	Source d'isolation	Références
Classe : <i>Alphaproteobacteria</i> Ordre : <i>Rhizobiales</i> Famille : <i>Rhizobiaceae</i> Genre : <i>Rhizobium</i>	<i>R. leguminosarum</i>		Frank B et al., 1889
	<i>Symbiovar viciae</i>	<i>Pisum, Viciae, Lens, Lathyrus</i>	Frank B et al., 1889 ; Jordan DC et al., 1982
	<i>Symbiovar trifolii</i>	<i>Trifolium pratense</i>	Jordan DC et al., 1982 ; Renan A et al., 2012
	<i>Symbiovar phaseoli</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Frank B et al., 1889 ; Jordan DC Et al., 1982
	<i>R. galegae</i>	<i>Galega, Leucaena</i>	Terefework Z et al., 1998 ; Lindström K et al., 1989
	<i>Symbiovar officinalis</i>	<i>Galega orientalis</i>	Lindström K et al., 1989
	<i>Symbiovar orientalis</i>	<i>Galega officinalis</i>	
	<i>R. tropici</i>	<i>Phaseolus, Medicago, Macroptilium</i>	Martinez-Romero E et al., 1991
	<i>R. leucaenae</i>		Renan A et al., 2012
	<i>R. tropici</i>		Martinez-Romero E et al., 1991
	<i>R. endophyticum</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Lopez LA et al., 2010
	<i>R. phaseoli</i>	<i>Phaseolus</i>	
	<i>R. fabae</i>	<i>Vicia faba</i>	Tian CF et al., 2008
	<i>R. etli</i>	<i>Phaseolus,</i>	Segovia L et al., 1993
	<i>Symbiovar mimosae</i>	<i>Mimosa affinis</i>	Wang LX et al., 1999
	<i>Symbiovar phaseoli</i>	<i>Phaseolus</i>	Souza V et al., 1994
	<i>R. undicola</i>	<i>Neptunia natans</i>	De Lajudie P et al., 1998
	<i>R. gallicum</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Amager N et al., 1997
	<i>Symbiovar phaseoli</i>		
	<i>Symbiovar gallicum</i>		
	<i>R. giardinii</i>		
	<i>Symbiovar phaseoli</i>		
	<i>Symbiovar giardinii</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	
	<i>R. hainanensis</i>	<i>Desmodium sinuatum, Centrosema, etc.</i>	Chen WX et al., 1988
	<i>R. huautlense</i>	<i>Sesbania herbacea</i>	Wang ET et al., 1998
	<i>R. mongolense</i>	<i>Medicago ruthenica, Phaseolus</i>	Van Berkum P et al., 1998
	<i>R. yanglingense</i>	<i>Amphicarpaea</i>	Tan ZY et al., 2001
	<i>R. larrymoorei</i>	<i>Ficus benjamina</i>	Bouzar HD et al., 2001
	<i>R. indigoferae</i>	<i>Indigofera spp</i>	Wei GH et al., 2002
	<i>R. sullae</i>	<i>Hedysarum</i>	Squartini A et al., 2002
<i>R. loessense</i>	<i>Astragalus, Lespedeza</i>	Wei GH et al., 2003	
<i>R. cellulosityticum</i>	<i>Populus alba</i>	Garcia-Fraile P et al., 2007	

Genre : <i>Devosia</i>	<i>Devosia neptuniae</i>	<i>Neptunia natans</i>	Rivas R et al., 2003
Famille : <i>Bradyrhizobiaceae</i>	<i>B. japonicum</i>	<i>Glycine max, Glycine soja</i>	Jordan DC 1984 ; Jordan DC et al., 1982
Genre : <i>Bradyrhizobium</i>	<i>B. elkanii</i>	<i>Glycine max</i>	KuyKendall LD et al., 1992
	<i>B. liaoningense</i>	*	Xu LM et al., 1995
	<i>B. yuanmingense</i>	<i>Lespedeza</i>	Yao ZY et al., 2002
	<i>B. betae</i>	<i>Betae vulgaris</i>	Rivas R et al., 2004
	<i>B. canariense</i>	<i>Genistea et Loteae</i>	Vinuesa P et al., 2005
	<i>B. iriomotense</i>	<i>Entada koshunensis</i>	Islam MS et al., 2008
	<i>B. jicamae</i>	<i>Pachyrhizus erosus</i>	Ramirez-Bahana MH et al., 2009
	<i>B. lablabi</i>	<i>Lablab purpureus</i>	Islam MS et al., 2008
	<i>B. huanghuaihaiense</i>	<i>Glycine max</i>	Zhang YM et al., 2012
	<i>B. cytisi</i>	<i>Cytisus villosus</i>	Chahbourne R et al., 2011
	<i>B. daqingense</i>	<i>Glycine max</i>	Wang JY et al., 2013
	<i>B. denitrificans</i>	<i>Aeschynomene</i>	Van Berkum P et al., 2006
	<i>B. oligotrophicum</i>	*	Ramirez-Bahana MH et al., 2013
	<i>B. pachyrhizi</i>	<i>Pachyrhizus erosus</i>	
Classe : <i>Beta</i> <i>Proteobacteria</i>	<i>B. caribensis</i>	<i>Vertisol microaggregates</i>	Achouak W et al., 1999
Ordre : <i>Burkholderiales</i>	<i>C. taiwanensis</i>	<i>Alysicarpus glumaceus</i>	Moulin L et al., 2001
Famille : <i>Burkholderiaceae</i>	<i>B. tuberum</i>	<i>Aspalatus carnosus</i>	Vandamme P et al., 2003
Genre : <i>Burkholderia</i>	<i>B. phymatum</i>	<i>Machaerium lunatum</i>	
	<i>B. nodosa</i>	<i>Mimosa bimucronata, Mimosa Scabrella</i>	Chen WM et al., 2007
	<i>B. sabiae</i>	<i>Mimosa caesalpiniifolia</i>	Chen WM et al., 2008
	<i>B. mimosarum</i>	<i>Mimosa spp.</i>	Chen WM et al., 2003
	<i>B. rhizoxinica</i>	<i>Rhizopus microsporus</i>	Partida-Martinez LP et al., 2007
	<i>B. diazotrophica</i>	<i>Mimosa spp.</i>	Sheu SY et al., 2013
	<i>B. endofungorum</i>	<i>Rhizopus microsporus</i>	Partida-Martinez LP et al., 2007
	<i>B. heleia</i>	<i>Eleocharis dulcis</i>	Aizawa T et al., 2010
	<i>B. symbiotica</i>	<i>Mimosa spp.</i>	SHEU (S.Y) et al., 2012
	<i>C. taiwanensis</i>	<i>Mimosa sp.</i>	Vandamme et al., 2004

I.5.2. Symbioses mycorhizienne

I.5.2.1. Définition et caractéristiques

Ethimologiquement, le terme mycorhizes dérive de deux mots Grecs mukès qui signifie champignon et rhiza qui signifie racine. Il fut créé par Frank en 1885, pour désigner des unions durables, impliquant des échanges bénéfiques, entre les racines des végétaux et le mycélium de champignons édaphiques (Strullu, 1985 ; Smith & Read, 1997). Il s'agit d'une association symbiotique où les partenaires coexistent activement d'un point de vue physiologique, écologique et reproductif. Les champignons se développent aussi bien à l'intérieur des racines qu'autour d'elles en formant un réseau de filaments qui amplifie considérablement la surface de contact entre les racines et le sol. Les mycorhizes constituent des composantes essentielles dans la relation sol-plantes-microorganismes (Abbas, 2014). Il est actuellement admis que cette symbiose est une association obligatoire et à bénéfice réciproque entre les deux symbiotes. La présence de mycorhizes est donc un phénomène général chez les plantes à l'exception de quelques familles comme les *Brassicaceae*, les *Caryophyllaceae*, les *Cyperaceae*, les *Juncaceae*, les *Chenopodiaceae* et les *Amaranthaceae* qui présentent très peu d'associations mycorhiziennes (Strullu, 1991). Parmi les symbioses végétales, les mycorhizes à arbuscules sont de loin les plus abondantes et les plus importantes sur les plans écologique et économique (Schüßler *et al.*, 2001). Ces derniers coexistent avec près de 80 à 90 % des plantes à racines (Ptéridophytes, Gymnospermes et Angiospermes) dans les écosystèmes naturels et les agrosystèmes. Les mycorhizes à arbuscules sont les plus primitives et les plus répandues dans les écosystèmes naturels et cultivés (Tedersoo *et al.*, 2010) et seraient à l'origine des autres types de symbioses mycorhiziennes. Les champignons mycorhiziens sont apparus sur terre il y a environ 400 millions d'années et sont considérés comme étant à l'origine de la flore terrestre il y a 450 millions d'années (Wang & Qiu, 2006). Ces relations symbiotiques sont caractérisées par un état d'équilibre physiologique permettant aux symbiotes impliqués, d'en tirer des bénéfices mutuels.

I.5.2.2. Classe et structure des champignons

Les mycorhizes sont classés en plusieurs catégories selon les caractéristiques structurales et l'interface impliquée dans les échanges de nutriments entre les symbiotes. Smith et Read (1997) distinguent sept types de mycorhizes dont les principaux morphophytes sont caractérisés par les ectomycorhizes et les endomycorhizes. D'après Anissa Lounes-Hadj Sahraoui (2013), Trois principaux types d'associations mycorhiziennes sont répertoriés: les ectomycorhizes, les endomycorhizes et les ectendomycorhizes (Fig.7).

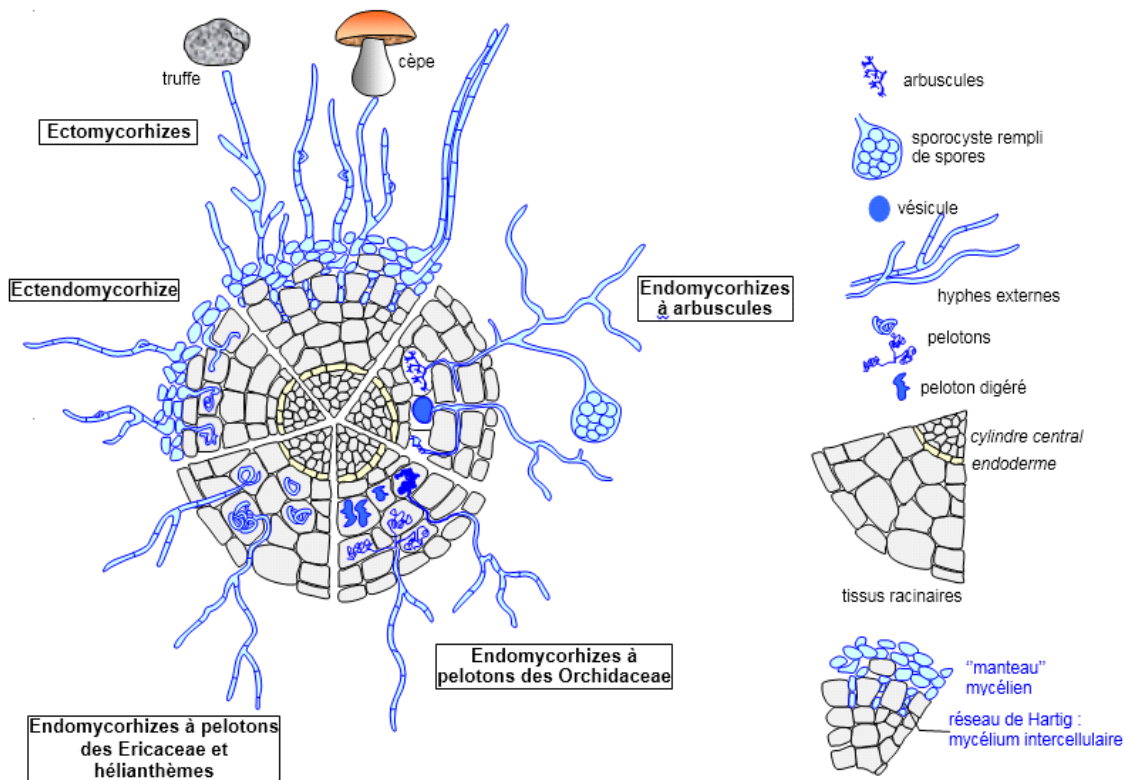


Fig. 7. Types mycorrhiziens sur une coupe transversale de racine (Le Tacon, 1985).

I.5.2.2.1. Ectomycorhizes

Les ectomycorhizes constituent le deuxième groupe de mycorhizes les plus rencontrées. Les champignons formant les ectomycorhizes appartiennent au groupe des champignons supérieurs tels que les Basidiomycètes et les Ascomycètes (Harley, 1989). Mais, d'autres classes de champignons sont également impliquées dans ce type d'association. Il s'agit des Phycomycètes et des Deutéromycètes (Harley, 1989). La plupart de ces champignons se développent sur milieu axénique. Certains sont même spécifiques à certaines espèces de plantes (Brundrett *et al.*, 1996).

Les ectomycorhizes sont très utiles dans la nutrition des arbres et dans des processus de recyclage des nutriments du sol. Elles possèdent plus de 5000 espèces regroupées en 73 genres et 9 ordres (Molina *et al.*, 1992 ; Brundrett *et al.*, 1996). Cependant, l'association avec les ectomycorhizes concerne un petit nombre d'espèces végétales, seulement 5 % des plantes vasculaires particulièrement les espèces ligneuses (Garbaye, 1988). D'après Mousain (1991), la symbiose ectomycorhizienne ne concerne que 3 % des espèces végétales. Ce type d'association est représenté surtout chez les essences forestières des régions tempérées et de la forêt boréale, mais il a été décrit aussi chez quelques espèces tropicales de la famille des Dipterocarpaceae, Euphorbiaceae, Cesalpiniaceae, Myrtaceae et Fagaceae (Redhead, 1980).

La symbiose ectomycorhizienne est caractérisée principalement par la présence de deux structures spécifiques: le manchon compact, qui est le manteau fongique et le réseau de Hartig. Le premier est constitué d'hyphes assemblés enveloppant la racine. Il a un rôle d'accumulateur des réserves, notamment de polyphosphates et de glycogène. Le deuxième est constitué d'hyphes qui ont pénétré entre les cellules de l'épiderme et du cortex racinaire sans traverser la paroi, dont le rôle est d'assurer les échanges avec les cellules racinaires (Comandini *et al.*, 2006).

I.5.2.2.2. Ectendomycorhizes

Les ectendomycorhizes sont appelées ainsi parce qu'elles possèdent à la fois des caractères d'ectomycorhizes (la présence du manteau et du réseau intercellulaire (réseau du Hartig)), et des caractères d'endomycorhizes (la colonisation des cellules racinaires par les hyphes mycéliennes). Ce type d'association symbiotique est rencontré chez les Arbutaceae, les Monotropaceae et sont formées par des Basidiomycètes (*Cortinarius*, *Boletus*, etc) (Mikola, 1988). Mais aussi des Ascomycètes sont souvent impliqués (Mousain *et al.*, 1996).

I.5.2.2.3. Endomycorhizes

Les champignons endomycorhiziens sont des champignons non spécifiques, s'associant aux plantes forestières agricoles et horticoles. Ils établissent une symbiose à bénéfices réciproques avec la grande majorité des familles de plantes (92 %) (Wang & Qiu, 2006). Ce sont des champignons telluriques au phylum récemment érigé des Gloméromycètes (Schüssler *et al.*, 2001). Les structures mises en place par les champignons concernés ne sont pas visibles à l'œil nu. Elles ne sont visibles qu'après coloration et observation microscopique. Les caractéristiques de cette symbiose se traduisent par le développement du champignon à l'intérieur des cellules corticales, par l'inexistence de manteau fongique autour de la racine de l'hôte, du manchon extérieur et de réseau intercellulaire. Par contre, les hyphes se développent à la surface de la racine et s'étendent même, bien à l'extérieur, dans le sol (Smith & Jakobsen, 2003; Shi *et al.*, 2007). Le mycélium pénètre dans les racines en franchissant les parois mais pas le plasmalemme des cellules-hôtes du cortex, ou en colonisant les méats intra racinaires. Le mycélium forme des suçoirs (arbuscules) et des organes de réserve (vésicules) à l'intérieur des racines (Mousain, 1991). Par germination des hyphes, les champignons endomycorhizogènes produisent des organes mycorhiziens spéciaux, les spores, émis dans le sol. La diversité des spores est remarquable et elle est souvent utilisée comme structure de référence pour l'identification morpho-anatomique des espèces (Fig.8).



Fig. 8. Diversité morphologique des CMA des sols du Cameroun (Ngonkeu *et al.*, 2013). De plus, d'autres structures, des vésicules et des arbuscules (à l'origine du nom de ces types de champignons), sont établies par les hyphes à l'intérieur des cellules corticales (Srivastava, 1996).

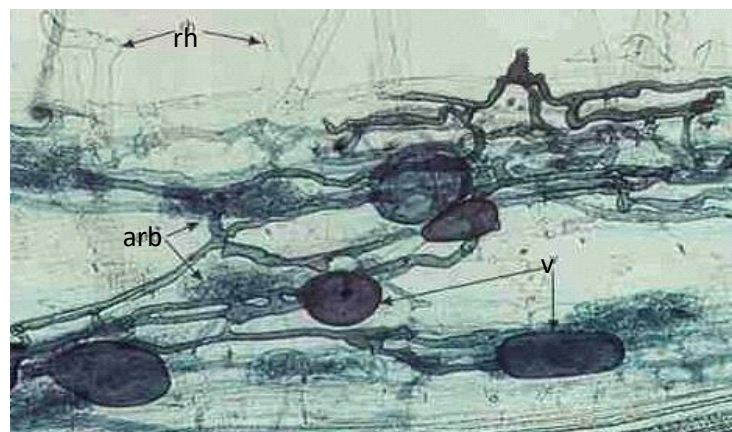


Fig. 9. Structures composant les mycorhizes à arbuscules et à vésicules. *rh*: hyphe, *arb* : arbuscule; *v*: vésicule

Il existe 3 types d'endomycorhizes :

- Les endomycorhizes des Orchidées et des Ericacées formées respectivement par des Basidiomycètes et des Ascomycètes de la famille des Pezizaceae ; dans ces deux cas, le mycélium forme des pelotons à l'intérieur des cellules du parenchyme cortical
- Les endomycorhizes des Cistacées où les pénétrations endocellulaires prennent une forme coralloïde

; les champignons symbiotiques responsables appartiennent aux Ascomycètes hypogés, de la famille des Terfeziaceae.

-Les mycorhizes à vésicules et arbuscule (Barea & Honrubia, 1993).

Les mycorhizes à vésicules et arbuscules, formées par des champignons inférieurs, sont en interaction avec plus de 90 % des plantes terrestres. Elles font intervenir un groupe de champignons de la classe des Glomeromycètes. Ce sont les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA), connus depuis la fin du dix-huitième siècle (Strullu, 1990). Ces associations doivent leur nom aux structures fongiques résultant des hyphes intracellulaires qui se ramifient intensément à l'intérieur des cellules du cortex racinaire pour former des structures caractéristiques des endomycorhizes telles que les arbuscules et les vésicules.

I.5.2.3. Classification des champignons mycorhiziens à arbuscules

La première classification fut basée essentiellement sur la similarité des phénotypes de leurs spores. Ainsi, 5 genres ont été définis : *Endogone*, *Glomus*, *Sclerosystis*, *Acaulospora* et *Gigaspora* (Gerdman & trappe, 1974). Ensuite, les mêmes auteurs ont révisé la famille des Endogonacées. 44 espèces au sein de 7 genres ont été caractérisées. Parmi elles, beaucoup de taxons ont été redéfinis, 2 genres (*Acaulospora*, *Gigaspora*) et 12 nouvelles espèces ont été décrits.

Grâce à l'avancée scientifique notamment avec l'avènement de la biologie moléculaire, toute la classification des CMA a été revue et passée de la classification basée uniquement sur les caractères morphologiques à celle incluant aussi les études moléculaires. Redecker *et al.* (2000) ont utilisé à la fois les données morphologiques et moléculaires et ont transféré *Sclerocystis coremioides* dans le genre *Glomus*, éliminant ainsi le genre *Sclerocystis*. Se basant sur les données morphologiques, moléculaires et biochimiques, Morton & Redecker (2001) ont décrit deux autres familles : Archaeosporaceae et Paraglomaceae. La première famille renferme le genre *Archaeospora*, avec trois espèces et la seconde le genre *Paraglomus* avec aussi deux espèces. Les CMA sont actuellement classés dans le phylum des Glomeromycota (Schüssler *et al.*, 2001) avec quatre ordres, dix familles et approximativement 200 espèces décrites (Raab & Redecker, 2006) (Fig. 9.).

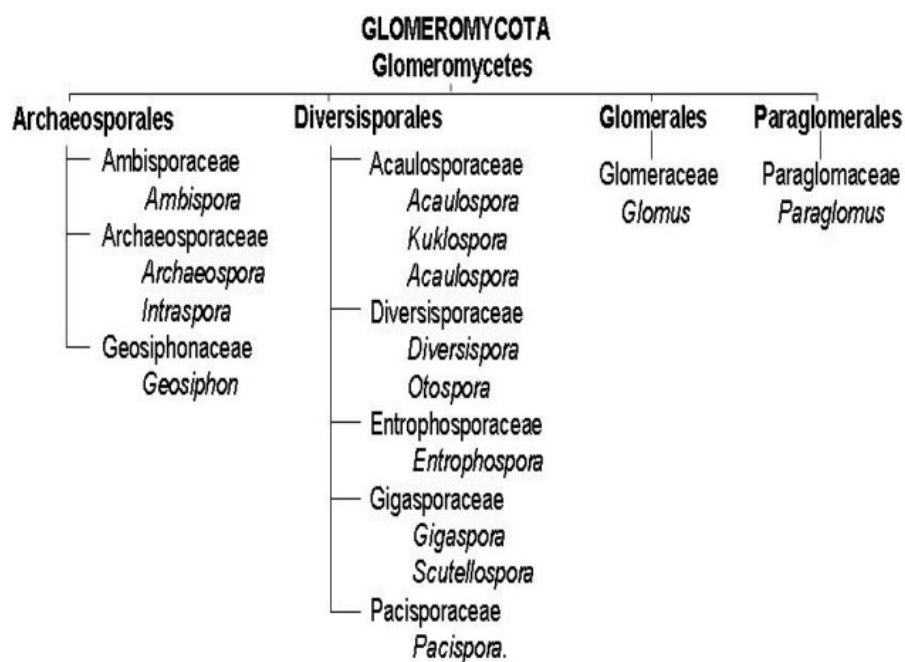


Fig. 10. Classification des champignons mycorhiziens à arbuscules (Palenzuela *et al.*, 2008).

I.5.2.3.1. Cycle de vie des champignons mycorhiziens à arbuscules

La grande majorité des CMA sont, des symbiotes obligatoires et donc ne peuvent se développer qu'en présence d'une plante hôte. Cependant il existe d'autres qui peuvent se développer en absence de plante hôte, mais avec un développement limité de leurs hyphes (Diop *et al.*, 1994). Le cycle de développement des CMA passe par cinq (05) stades au cours desquels sont enregistrés des modifications anatomiques et physiologiques importantes chez les symbiotes. L'infection de la plante hôte peut être initiée à partir de plusieurs propagules : spores, fragments racinaires mycorhizés, hyphes présents dans le sol ou même des vésicules isolées. En effet, Les chlamydospores germent en donnant un promycélium (Stade 1), qui développe un appressorium lorsqu'il rencontre une racine (Stade 2). Ensuite, le champignon pénètre dans la racine en formant un mycélium secondaire et des arbuscules (Stade 3). Le mycélium progresse entre les cellules racinaires, se renfle en vésicules (stade 4). Le mycorhize ainsi formée produit un réseau extra-matriciel qui est à l'origine des chlamydospores lesquelles seront libérées dans le sol après maturation (Stade 5). Pendant la sénescence de la racine ou des tissus corticaux, les vésicules sont libérées dans le sol et deviennent saprophytes (Fig.11.).

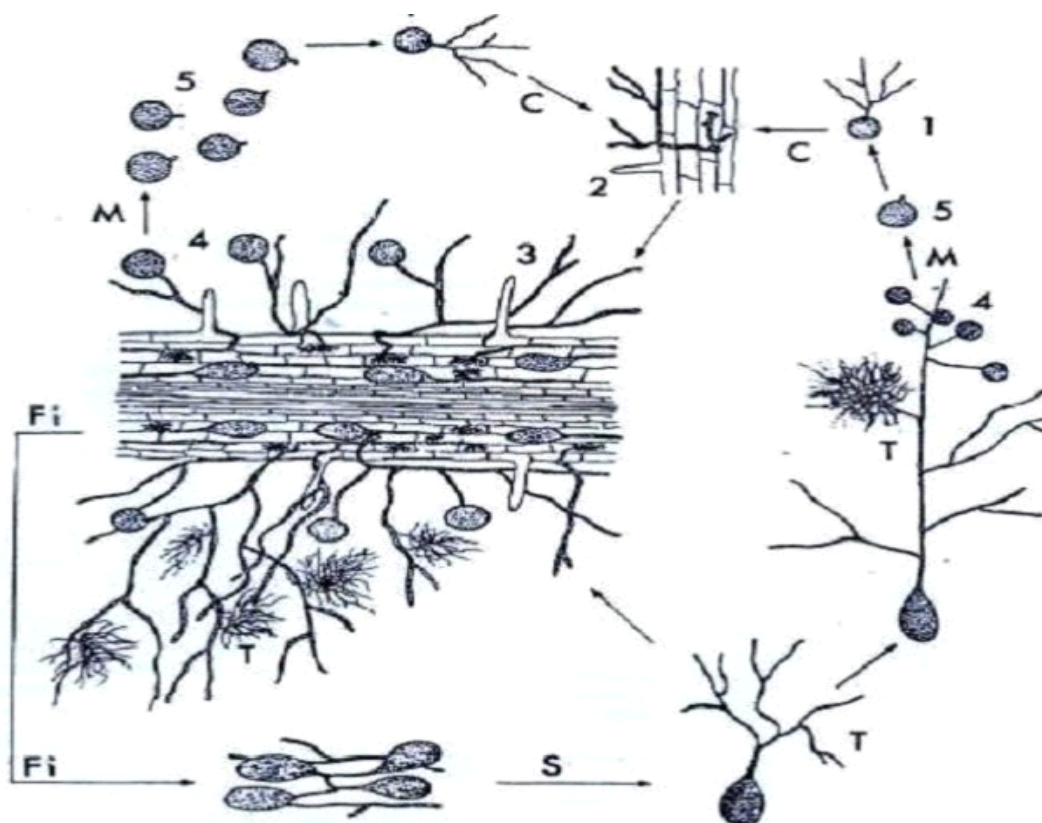


Fig. 11. Cycle de développement des CMA (Strullu *et al.*, 1997). C=contact racinaire ; Fi=forme intra-racinaire ; M=maturation sporale ; S=phase saprophytique et T= thalle.

I.5.2.3.2. Facteurs limitant le développement des champignons mycorhiziens à arbuscules et la mycorhization

Les systèmes culturels tels le labour, la culture itinérante sur brûlis affectent la diversité des CMA (Jonhson & Pflieger, 1992). La germination des spores, la formation et le développement des mycorhizes sont influencés par un ensemble de facteurs notamment le pH, l'aération, l'humidité, la température, la lumière, la texture du sol, les éléments minéraux et la matière organique. Il a été remarqué par exemple, que les spores du genre *Acaulospora* et *Gigaspora* germaient mieux à pH acide, alors que celles du genre *Glomus* préféraient des pH autour de la neutralité. L'application d'engrais ou de pesticides peut avoir aussi des effets néfastes sur les populations de CMA. Cette action est fonction de la substance active, du mode d'action, de la dose utilisée et de la date d'application (Klironomos *et al.*, 1993).

Morandi (1989) a révélé que les métaux lourds peuvent réduire et éliminer, dans certains cas, la colonisation par les CMA et la germination des spores de ces champignons au champ. Les travaux de Boyle & Paul (1988) montrent qu'il existe une corrélation négative entre la concentration du Zinc et la colonisation des racines par les champignons à arbuscules dans des sols traités par des boues industrielles.

La salinité du sol peut avoir également une influence sur le développement et l'activité de la microflore endomycorhizienne par des mécanismes directs ou indirects. En effet, le sel retarde la germination des spores de CMA et réduit le taux d'élongation du mycélium (Millen *et al.*, 1998). Par ailleurs, les travaux de Buwalda *et al.* (1983) révèlent que les effets des CMA en condition de stress salin deviennent divers et les résultats observés dépendent de l'isolat fongique et de la plante-hôte utilisée. Le développement d'un CMA peut être favorable à haute température et rester moins favorable sous basse température. Sieverding (1988) a montré que peu d'isolats de CMA (*Acaulospora* et *Scutellospora*) sont efficaces à faible température (20°C). La symbiose mycorhizienne a plus d'affinité avec les pH compris entre 5 et 8,5.

I.5.2.4. Importances des champignons mycorhiziens à arbuscule (CMA)

I.5.2.4.1. Nutrition hydrique et minérale

L'amélioration de la nutrition hydrique des plantes grâce à la symbiose mycorhizienne est due à une meilleure utilisation de l'eau par la plante en raison d'une exploitation au-delà de la rhizosphère entreprise par les hyphes mycéliens (Auge, 2001). Par ailleurs, la présence d'un réseau d'hyphes des CMA permet à la plante de puiser l'eau dans de petits interstices qui ne sont habituellement pas accessibles aux racines des plantes. Cela se traduit par cette tendance qu'ont les plantes mycorhizées à moins souffrir du stress hydrique (Bárzana *et al.*, 2014 ; Augé *et al.*, 2015).

Les CMA améliorent l'acquisition des éléments minéraux, peu mobiles, par la plante dans le sol comme le phosphore, le potassium, le cuivre et le zinc (Grant *et al.*, 2005 ; Van Der Wal *et al.*, 2006). Il est estimé que chez les endomycorhizes, la longueur d'hyphes se développant dans le sol autour de chaque centimètre de racine peut atteindre 1,34 m. Le réseau d'hyphes s'étend ainsi donc au-delà de la zone d'appauvrissement de phosphore bio disponible qui se trouve autour des racines. Ceci permet à la plante d'accéder à un plus grand réservoir de phosphore (Smith & Smith 2012). Par ailleurs, le faible diamètre des hyphes permet à la plante d'accéder à des microsites inaccessibles par les racines trop grossières des plantes (Fig 12).

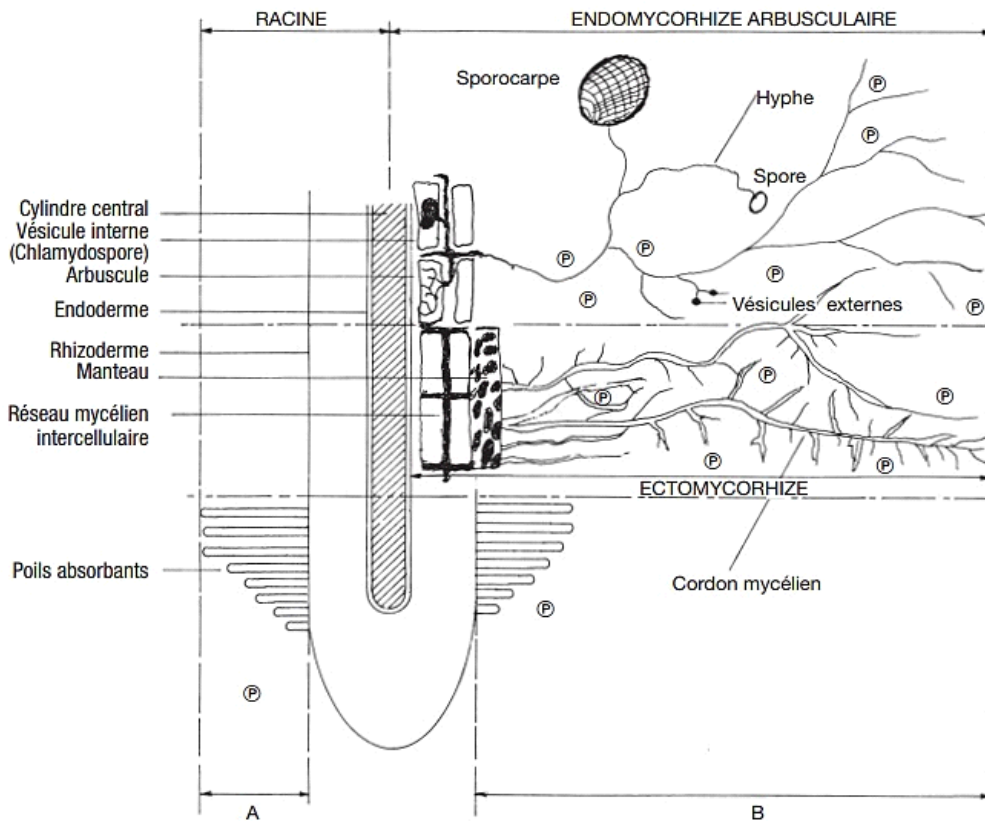


Fig. 12. Extension de la zone d'épuisement du phosphore autour des mycorhizes (Plenchette *et al.*, 2005). A= Zone d'épuisement du phosphore de la racine (1 mm). B= Zone d'exploration de la mycorhize (jusqu'à plusieurs dizaines de cm), p = phosphore.

Les oligo-éléments tels que le cuivre, le zinc, le manganèse et le fer sont aussi peu mobiles dans le sol. On estime que leur mécanisme d'absorption est le même que chez le phosphore, c'est-à-dire que l'augmentation de leur prélèvement est essentiellement due à une meilleure exploration du sol par les hyphes extra-racinaires. Vinayak & Bagyaraj (1990) ont effectivement observé une mobilisation plus importante de phosphore, zinc et le cuivre chez des plantes mycorhizées de citrange "troyer" (porte-greffe d'agrumes), par rapport aux mêmes plantes non mycorhizées.

Les CMA peuvent aussi améliorer la nutrition azotée des plantes. En effet, les CMA sont des décomposeurs et minéralisateurs de la matière organique azotée (Hodge *et al.*, 2001). Ils possèdent les équipements enzymatiques nécessaires à l'utilisation de l'ammonium et des nitrates (Strullu 1991). L'azote inorganique (NO_3^- et NH_4^+) est converti en arginine par le mycélium extra-racinaire puis dégradé dans le mycélium intra-racinaire avant d'être transféré à la plante sous forme de NH_4^+ (Govindarajulu *et al.*, 2005). Mais ceci n'est pas général, car dans certains cas, l'analyse minérale des plantes mycorhizées ne montrent pas une amélioration significative. Ces résultats pourraient être liés au type de champignon utilisé ou être attribués à un phénomène de dilution dû à la croissance plus rapide de la plante mycorhizée et surtout à une meilleure production de matière sèche aérienne.

I.5.2.4.2. Agrégation des sols

Les CMA améliorent la structure et la stabilité des sols par divers mécanismes. Les réseaux mycéliens contribuent physiquement à l'assemblage et au maintien des agrégats du sol par l'intermédiaire des hyphes qui croissent et se renouvellent constamment (Hamel & Planchette, 2007). Les agents responsables de cette stabilité des agrégats du sol sont généralement organiques et sont d'origine biologique. De même, ils sont toujours développés dans la rhizosphère. Selon Wright & Andersen (2000), les CMA produisent de la glomaline, une glycoprotéine qui agit par ses propriétés hydrophobes pour stabiliser les agrégats. Le mécanisme impliqué dans la stabilisation des agrégats est basé sur la fixation des particules du sol par les hyphes et les racines et sur l'exsudation des polysaccharides. Par ailleurs, la formation d'agrégats stables dans le sol peut être aussi attribuée au mycélium extra-racinaire des champignons produit par les racines mycorhizées et qui constitue un réseau tridimensionnel reliant la plante au sol environnant (Bearden & Petersen 2000).

I.5.2.4.3. Résistance aux stress biotiques et abiotiques

L'effet protecteur est une caractéristique très intéressante des CMA pour la plante hôte, que ce soit face à des stress abiotiques ou biotiques. L'état mycorhizé fournit à la plante une meilleure résistance aux stress abiotiques comme le stress hydrique, salin ou la présence de métaux lourds (Al-Karaki, 2000 ; Aroca *et al.*, 2007 ; Hildebrandt *et al.*, 2007). En effet, les résultats de recherche de Stribley (1990) en climat tempéré ont montré que, dans les sols où la faible disponibilité des phosphates limite la croissance des plantes, les plantes dont les racines sont infectées par les champignons mycorhiziens à arbuscules (*Glomus mosseae*) poussent mieux que celles qui en sont dépourvues. L'explication la plus simple serait un accroissement du volume de sol exploité, mais les champignons mycorhiziens à arbuscules pourraient aussi solubiliser les phosphates. Des expériences en serre suggèrent que la présence des CMA sur les racines des plantes protègent la plante des effets négatifs de la salinité (Poss *et al.*, 1985) et de la sécheresse (Nelsen & Safir, 1982). La symbiose mycorhizienne confère également à la plante une tolérance aux métaux lourds et aux polluants organiques (Joner & Leyval 2003). Par ailleurs, Janouskova *et al.* (2006) ont démontré que les CMA étaient capables de réduire les effets indésirables des éléments traces métalliques tels que le cadmium sur la croissance des plantes par un processus de phytostabilisation. La glomaline serait, impliquée dans ce processus puisqu'elle peut se lier aux métaux lourds. Ainsi, les CMA Protègeraient les plantes en accumulant et en rendant moins biodisponibles les métaux. Cette glomaline permet de simplifier l'effet de ces stress. Elle confère par exemple à la plante une tolérance à l'acidité des sols et au stress

Les CMA ont aussi un effet bénéfique sur le stress biotique des plantes. En effet, des plantes mycorhizées sont plus résistantes à certains pathogènes racinaires (Whipps, 2004) mais aussi foliaires (Liu *et al.*, 2007 ; Campos-Soriano *et al.*, 2011). Les CMA induisent chez la plantes mycorhizés la synthèse ou l'augmentation de la synthèse des composés phénoliques phytoalexines qui interviennent dans les mécanismes de défense et Réduisent les symptômes de la maladie (Tchameni *et al.*, 2012 ;Ismail *et al.*,2013).il sont utilisés comme agent de lutte biologique. Ils permettent de réduire les dommages causés par de nombreux pathogènes du sol sur une variété d'espèces de plantes cultivées. Les champignons endomycorhiziens permettent à ces végétaux de résister contre les pathogènes du sol par le phénomène d'antibiose et, en induisant la formation des tannins qui intervient dans les mécanismes de défenses chez la plante hôte (Pozo *et al.*, 2013). La mycorhization conduit la plante dans un état actif d'immunisation qui lui permet d'être efficace dans ses réponses aux attaques des pathogènes (Jung *et al.*, 2012) (Fig.13). Les travaux d'Ismail *et al.* (2013) montrent que certains CMA comme *Glomus irregulare* peuvent réduire la production des mycotoxines de certains champignons. Les travaux de Herre *et al.*, (2007) ont montré que les CMA associés à certains endophytes foliaires ont permis de réduire les dommages causés par *Phytophthora palmivora* sur les cacaoyers. En effet, les CMA induisent les mécanismes de défense des plants du cacaoyer au niveau du sol et au niveau de la surface foliaire. Les deux principaux mécanismes sont probablement le déclenchement des réactions de défense des plantes suite à la signalisation impliquée dans l'autorégulation de la symbiose et la modification des communautés microbiennes de la mycorhizosphère créant ainsi des conditions défavorables pour l'installation des organismes pathogènes (Herre *et al.*, 2007 ; Tchameni *et al.*, 2011). En inoculant certaines souches de CMA (*Acaulospora tuberculata* et *Gigaspora margarita*) et de *Trichoderma asperellum* PR11, la susceptibilité de *P. megakarya* sur les plants de cacaoyers en pépinière a été réduite (Tchameni *et al.*, 2011). Chez les plantes mycohizées, Le réseau hyphe des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) s'étend au-delà de la zone de déplétion (gris), accédant à une plus grande surface de sol pour l'absorption du phosphate. Une zone de déplétion mycorhizienne-phosphate finira également par se former autour des hyphes AM (violet). D'autres nutriments qui ont amélioré l'assimilation dans les racines AM comprennent l'azote (ammonium) et le zinc. Les avantages de la colonisation comprennent des tolérances à de nombreux stress abiotiques et biotiques par induction d'une résistance systémique acquise (SAR) (Catherine *et al.*, 2017) (Fig.13).

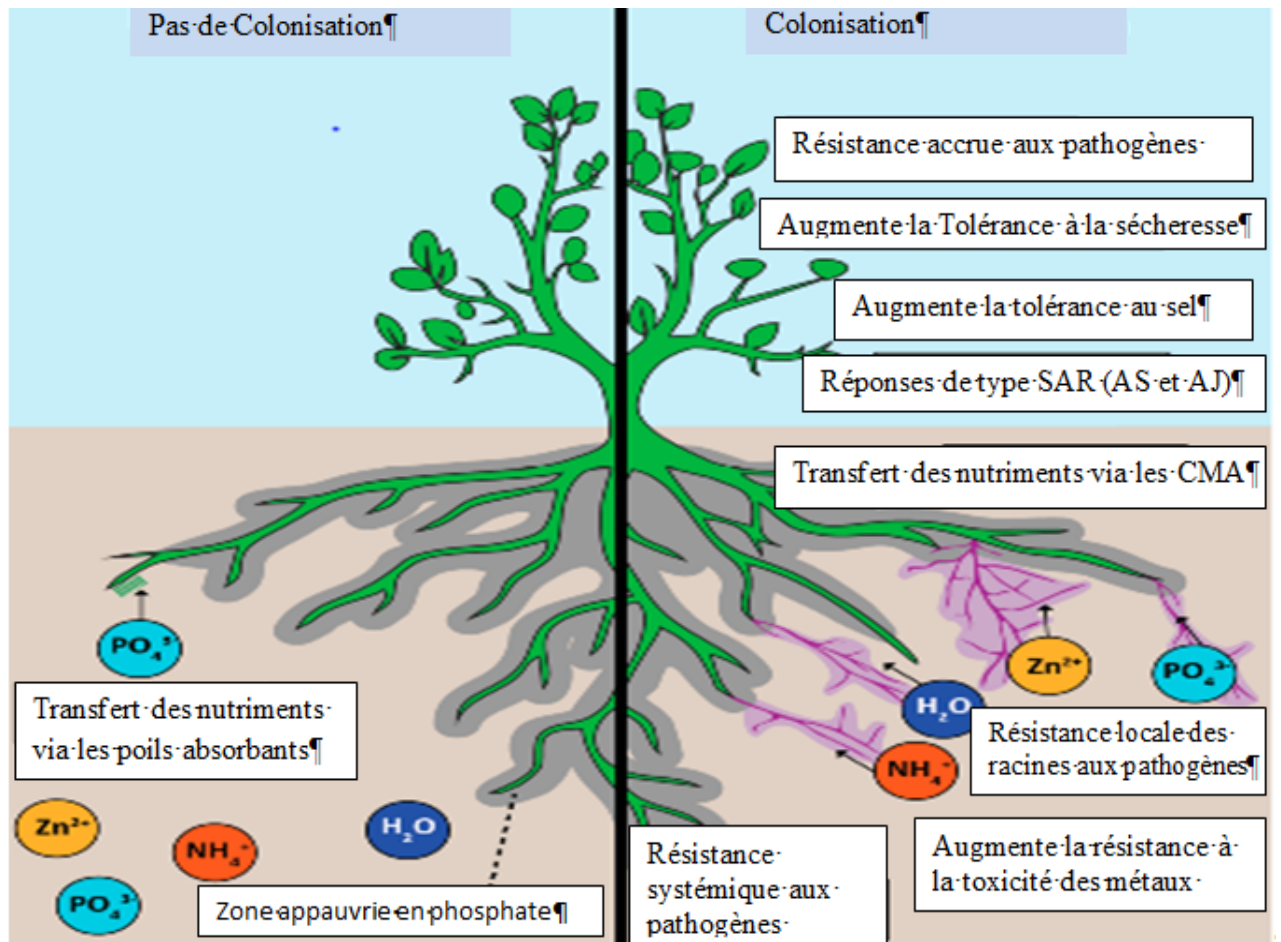


Fig. 13. Effets positifs de la colonisation mycorhizienne arbusculaire (MA). (Catherine *et al.*, 2017)

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

II.1. MATERIEL

II.1.1. Présentation des sites expérimentaux

Le présent travail a été réalisé d'une part dans le laboratoire de Biotechnologie et Environnement, Unité de Recherche de Phytopathologie et Protection des Végétaux du Département de Biologie et de Physiologie Végétales de l'Université de Yaoundé 1 ; dans le laboratoire Régionale de Lutte Biologique et de Microbiologie Appliquée de L'IRAD ; dans le laboratoire de Phytoprotection et Valorisation des Ressources Végétales de L'IRAD, dans le laboratoire des sols et analyse des pesticides du MINADER et d'autre part, en serre et en champ, dans les localités de Bangangté et Mfou situé respectivement dans le département du NDE Région de l'Ouest, dans le Département de la Mefou-et-Afamba Région du centre Cameroun.

II.1.2. Description des sites d'étude

L'essai en serre a été mené au sein de l'Université de Yaoundé1 de Novembre 2020 à Février 2021. Les essais en champ ont été menés en une campagne, dans deux sites, appartenant à deux zones agroécologiques différentes, durant la période allant de Septembre 2020 à Décembre 2021. Pour le site de Bangangté appartenant à la zone agroécologique III, caractérisée par un climat de type camerounien, marqué par deux saisons d'inégales longueurs, les températures moyennes basses de 19°C et les pluies abondantes. L'essai a été conduit sur une jachère de deux ans avec comme précédent cultural le maïs, et le haricot. Il est situé à 5°8'47,95182'' latitude Nord et de 10°32'23,29090'' de longitude Est à une altitude de 1287 m. Le site de Mfou appartient à la zone agroécologique V dite zone à pluviométrie bimodale. Elle est caractérisée par les températures moyennes qui varient de 22 à 29 °C et les précipitations moyennes annuelles varient de 1500-2000 mm. Le climat qui y règne est de type guinéen. Les sols sont ferrallitiques, acides, argileux avec une faible capacité de rétention des éléments nutritifs. L'essai a été conduit sur une jachère d'un an avec comme précédent cultural le macabo et le manioc. il est situé à 3°45'26,664'' de Latitude Nord et de 11°37'39,006'' de longitude Est à une altitude de 699 m (Fig.13.).

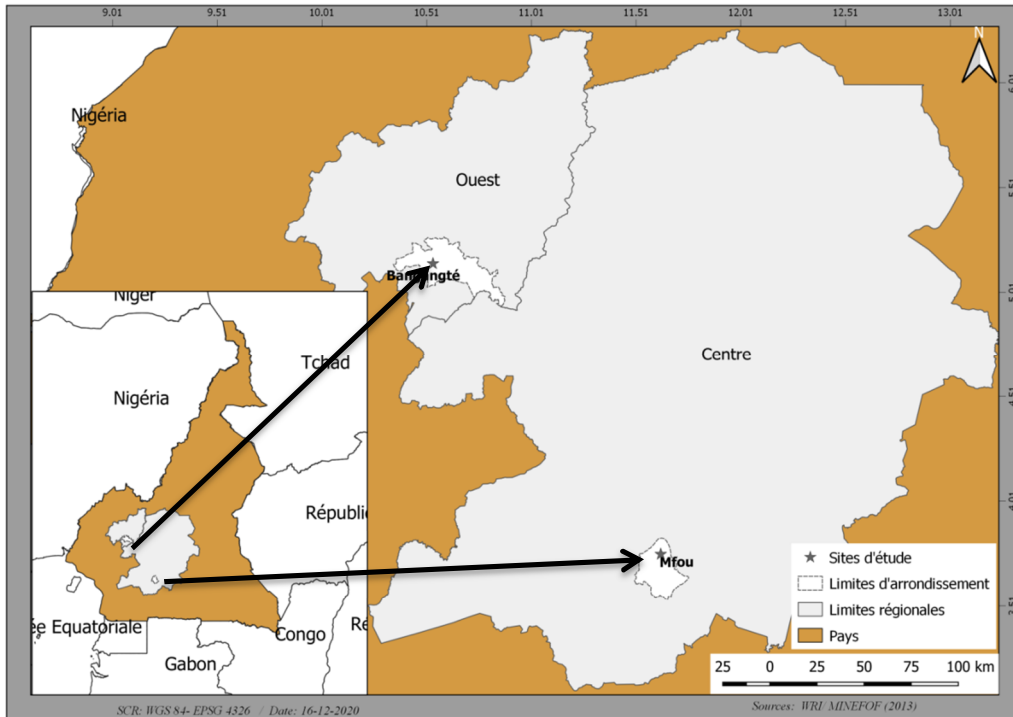


Fig. 14. Localisation des sites d'étude

II.1.3. Matériel végétal

Deux variétés de soja ont été utilisées, à l'issue du criblage des 43 variétés en présence (Tableau II). Ces variétés ont été retenues en fonction de la sensibilité d'une des variétés, de la résistance de l'autre à la rouille asiatique du soja, mais en tenant compte du rendement. En outre le mil et le niébé ont été utilisés lors du piégeage des CMA dans la rhizosphère des plants de soja suivant les travaux d'Oyong (1996).

Tableau II. Différentes variétés de soja et leur origine

Variétés	Origines	Exotique/Locale	Maturité (jours)
TGx2002-23DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
Afayak	CSIR-SARI (Ghana)	exotique	90 – 100
SoungPungun	CSIR-SARI (Ghana)	exotique	90 – 100
TGx2001-24DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
TGx2001-10DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
JENGUMA	CSIR-SARI (Ghana)	exotique	90 – 100
TGx2014-19FM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
Maksoy 3N	U. Makerere (Uganda)	exotique	90 – 100
TGx2001-13DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
TGx1987-62F	IITA (Nigéria)	exotique	90 – 100
Maksoy 2N	U. Makerere (Uganda)	exotique	90 – 100
S1140-5-4	SeedCo (Zimbabwe)	exotique	90 – 100
DPSB 8	KALRO (Kenya)	exotique	90 – 100
SNKGM011	Sensako(Afrique-Sud)	exotique	90 – 100
SCS-1	EIAR (Ethiopie)	exotique	90 – 100
S1150-5-22	SeedCo (Zimbabwe)	exotique	90 – 100
Clark 63K	EIAR (Ethiopie)	exotique	90 – 100
TGx2006-3F	IITA (Nigéria)	exotique	90 – 100
TGx2008-4F	IITA (Nigéria)	exotique	101 – 110
SC Saga	SeedCo (Zimbabwe)	exotique	90 – 100
TGx1991-22F	DARS (Malawi)	exotique	90 – 100
R3	IITA(Cameroun)	locale	110-120
TGX-1835-10E	IITA(Cameroun)	locale	90 – 100
R2	IITA(Cameroun)	locale	110-120
TGx-2001-8DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
TGx-2001-1DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
TGx-2002-1DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
TGX1485-1D	IITA (Nigéria)	exotique	90 – 100
TGX2004-10F	IITA (Nigéria)	exotique	101 – 110
TGX 2011-7F	IITA(Nigéria)	exotique	90 – 100
TGX 2010-3F	IITA(Nigéria)	exotique	90 – 100
TGX 2007-11F	IITA (Nigéria)	exotique	101 – 110
TGX 2004-3F	IITA(Nigéria)	exotique	90 - 100
TGX 2010-15F	IITA(Nigéria)	exotique	90 - 100
TGX 2011-3F	IITA (Nigéria)	exotique	90 – 100
TGX 2008-2F	IITA(Nigéria)	exotique	101 – 110
TGX 2004-13F	IITA (Nigéria)	exotique	90 - 100
TGX 2007-8F	IITA(Cameroun)	locale	90 – 100
TGX 1448-2F	IITA(Cameroun)	locale	90 – 100
TGX 2010-12F	IITA (Nigéria)	exotique	101 – 110
TGX 2002-14DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
TGX 2001-14DM	IITA (Zambie)	exotique	90 – 100
TGX 2010-11F	IITA (Nigéria)	exotique	90 – 100

II.1.4. Matériel fongique

Quatre souches de CMA à savoir : *Gigaspora gigantea*, *Denticutata nigra*, *Entrophopora ifrequens*, *Scutellospora scutata* issue de la rhizosphère du soja et les spores de *phakopsora pachyrhizi* agent causal des rouilles ont été utilisés. Les Quatre souches de CMA ont été obtenues après piégéage et criblage des différentes CMA sur le mil dans du sable stérilisé. des différents souches ont été utilisés seules et en association. Quant aux uredospores du pathogène elles ont été extraites sur les folioles infectées provenant des cinq zones agroécologiques du Cameroun. Après évaluation de l'agressivité l'isolat le plus virulent a été retenu pour la suite de l'étude.

II.1.5. Matériel phytosanitaire

Un produit chimique utilisé a été le Plantineb 80 WP qui est un fongicide de contact constitué de 80 % de Manèbe acheté au marché mokolo de la ville de Yaoundé. Il est utilisé d'une manière préventive contre plusieurs maladies des cultures florales : rouille, mildiou, anthracnose et bien d'autres. C'est une formulation en poudre mouillable s'employant après une mise en suspension dans l'eau à la dose de 2 à 2,5 kg/ha.

II.1.6. Autre matériel

Comme matériel technique, une machette, houes, des ficelles, un double décimètre, un bloc note, un sécateur, des sacs en plastiques, des fiches de terrain et du crayon, un appareil numérique, un GPS, et du sable, ont été utilisés. Au laboratoire plusieurs autres matériels ont été utilisés notamment: une hotte à flux laminaire, un incubateur, un microscope optique, les boîtes de Pétri, une pipette, l'emporte-pièce, le bécher, l'erlenmeyer, les scalpels, l'autoclave, le bleu de méthyl et l'eau oxygénée.etc.

II.2. METHODES

II.2.1. Evaluation de la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules dans la rhizosphère des plants de soja

II.2.1.1. Echantillonnage du sol de la rhizosphère

Les descentes sur le terrain ont été effectuées dans les cinq zones agroécologiques, afin d'extraire la rhizosphère de plante de soja en condition naturelle dans chaque site. Cinq prélèvements ont été effectués par zone agroécologique (Tableau III). Approximativement 3 à 5 Kg de sol près du système racinaire de 10 plantes de soja, choisis aléatoirement, ont été prélevés. Les échantillons ont été pris à une profondeur allant de 10 à 20 cm et homogénéisés pour obtenir un échantillon final représentatif de l'ensemble du site. Egalement, les racines fines ont été récoltées, lavées et conservées dans le GEE (Glycerol-Ethanol-Eau distillée, 1 :1 :1) pour des observations microscopiques (Abbas, 2014).

Tableau III. Coordonnées des localités par zone agro-écologique

ZAE	Localités	Longitude	Latitude	Altitude	Précédent cultural
ZAEI	Tokobere	14°8'39,876''	10°52'7,338''	443 m	soja
	Mokolo	13°51'41,88''	10°43'15,846''	779 m	mil
	soukoudou	13°51'56,502'',	9°50'34,776''	378 m	coton
	Sanguere	13°27'27,366''	9°16'16,404''	225 m	sorgho
	Kodec	14°24'35,67''	10°39'9,318''	369 m	coton
ZAEII	Mbe	13°36'7,626''	7°51'7,344''	582 m	arachide
	Wack II	13°33'7,53''	7°41'16,158''	669 m	mil
	Ngaoundéré I	13°60'4,97''	7°34'7,63	1124 m	mil
	Ngaoundéré II	13°55'9,75''	7°29'8,60''	1124 m	soja
	Ganganssoua	13°46'18,522'',	7°31'50,346'',	1116 m	jachère
ZAEIII	Bamenda	10°8'32,892''	5°56'43,656''	1264 m	jachère
	Mbouda	10°14'48,444''	5°38'9,834''	1416 m	maïs-soja
	Bangangté	10°32'15,33''	5°8'42,462''	12943 m	maïs -soja
	Foumbot	10°35'49,014'',	5°29'3,414'',	1033 m	soja
	Bafoussam	10°26'44,154''	5°27'19,884''	1493 m	maïs
ZAEIV	Mandjo	9°60'8,246''	4°76'8,140''	160 m	haricot
	kolla	9°50'4,241''	4°60'5,566''	155 m	haricot
	Lala	9°48'2,810'',	4°79'7,739''	143 m	haricot
	Pendja	9°41'34,458	4°38'28,272'',	1700m	jachère
	Kumba	9°27'45,306'',	4°35'17,37''	152 m	jachère
ZAEV	Mbalmayo	11°30'48,756''	3°32'37,02''	670 m	maïs
	Bafia	11°13'59,592''	4°44'27,756''	483 m	maïs- soja
	Fourgerole	11°33'42,114''	3°54'39,66''	694 m	blé
	Batchenga	11°41'28,842''	4°17'11,82''	508 m	maïs
	Nkolbisson	11°27'28,15''	3°52'10,56''	732 m	soja

II.2.1.2. Analyse physico-chimique des sols

Les analyses des sols ont été effectuées au Laboratoire d'Analyses des Sols et de Chimie de l'Environnement (LABASCE) de Dschang suivant les méthodes internationales préconisées par Pauwels *et al.* (1992) et la granulométrie par la méthodologie décrite par Ebanga *et al.* (1982). Les variables analysées ont été : le pH, la matière organique (MO), les bases échangeables (BE), la capacité d'échange cationique (CEC), la conductivité électrique (CE), la teneur en eau pondérale, la densité apparente à l'état sec (Da), l'azote total (N T), le phosphore assimilable (pass), l'acidité échangeable (AE), la texture des sols.

II.2.1.3. Piégeage des mycorhizes à arbuscules du sol

Plusieurs méthodes de piégeages ont été décrites par Brundrett *et al.* (1996). Selon ces auteurs le piégeage peut être effectué à partir du sol, des racines des plantes ou à partir des plantes vivantes provenant directement du champ et cultivées dans un substrat stérilisé. La méthode de piégeage

utilisée dans le cadre de cette étude a été celle décrite par Sieverding (1991) et Brundrett *et al.* (1996). Environ 200 g de sol de chaque échantillon a été pris en sandwich entre deux couches de sable préalablement stérilisées dans des sachets plastiques noirs de 1 kg perforés au tiers inférieur (Fig.15A) ; Ceci à raison de trois répétitions par échantillons. Ces derniers ont été ensemencés à raison de 2 à 3 graines de mil et niébé par sachet comme plante hôte (Fig.15B). Ces graines de mil et niébé ont été préalablement désinfectées à l'hypochlorite de sodium à 10 % pendant 15 minutes et rincées trois fois à l'eau de robinet. Les sachets ont été placés dans des plastiques non perforés afin de conserver l'humidité. Les plantes ont grandi dans ces conditions pendant 3 mois (Fig.15C). Ensuite les sachets ont été transférés à l'abri dans l'optique de provoquer le stress hydrique susceptible d'induire la sporulation. Trois semaines plus tard, la rhizosphère a été prélevée pour l'extraction des spores.

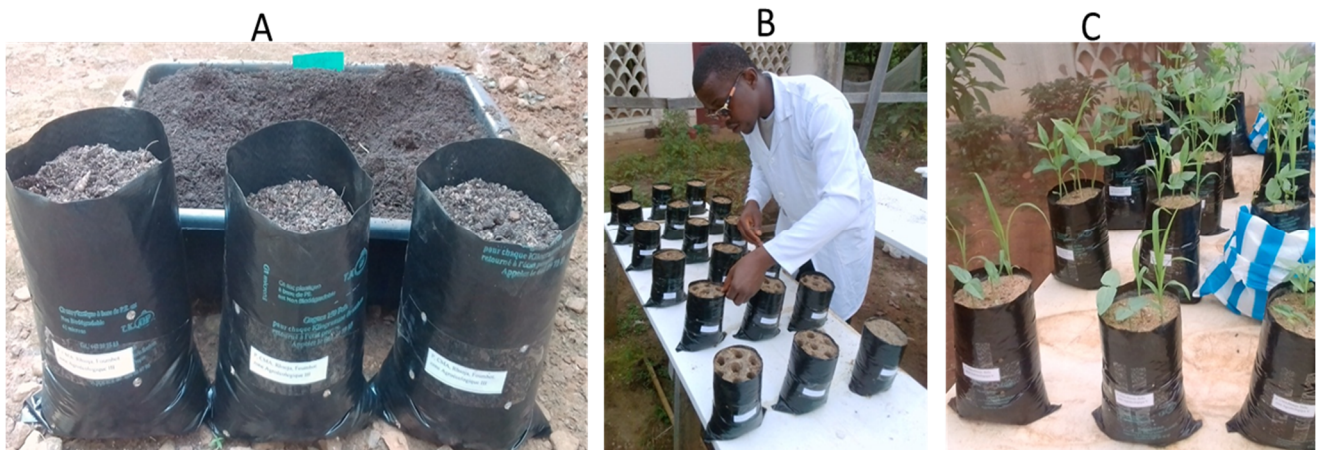


Fig. 15. Différentes étapes de piégeage : (A) inoculum en sandwich (B) ensemencement (C) croissance végétative

II.2.1.4. Isolement, Caractérisation et Description morphologique des spores de CMA observées dans la rhizosphère du soja

Pour chaque traitement, les répétitions ont été mélangées puis homogénéisées. Un échantillon de 200 g de substrat prélevé dans chaque mélange de piégeage a été utilisé pour l'extraction des spores par tamisage sous filet d'eau tel que décrit par Gerdmann & Nicolson (1963), via une série de mailles de 710, 250, 125 et 45 μ m. Au total trois extractions par échantillons ont été effectuées, soit 75 extractions pour les 25 échantillons. La suspension sporale contenue dans les tamis, après centrifugation manuelle a été versée dans les boîtes de pétri quadrillée, pour faciliter le comptage des spores (Ngonkeu, 2003). Ces dernières ont été comptées à l'aide d'une loupe binoculaire et regroupées en fonctions de leurs tailles, leurs couleurs, leurs formes, des ornementsations des caractéristiques de leurs paroi et de leurs hyphes suspenseurs. Le nombre moyen des spores a été exprimé par 100 g de substrat sec. Les spores ont été montées entre lame et lamelle dans le

Polyvinylalcoylglycérol (PVLG) avec le réactif de Melzer Jossierant, (1983) et identifiées sur la base des descriptions morphologiques publiées par INVAM (International culture collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi).

II.2.1.5. Purification et Multiplication

Inspiré de la méthodologie de Brundrett *et al.* (1996), les spores obtenues ont été regroupées selon la couleur et la taille, puis inoculées sur des racines de *Sorghum bicolor* en croissance végétative dans du sable stérile introduite dans des sachets. Après 3 mois de culture, les plantes ont été stressées dans l'optique de provoquer la sporulation. Une fois que les spores extraites sont caractérisées, la phase de multiplication a été enclenchée. Elle consiste en une production en masse de l'inoculum pour une utilisation en champ. Ces spores extraites et identiques ont été de nouveau inoculées dans des sacs contenant du sable stérilisé ayant pour plante hôte *Sorghum bicolor*. Trois mois plus tard les plantes ont été stressées et le nombre de spores quantifié par 100 g de sol (Fig.16).



Fig. 16. Production en masse des spores de: (A) *Gigaspora gigantea* ; (B) *Denticutata nigra* ; (C) *Entrophopora ifrequens* ; (D) *Scutellospora scutata*

II.2.1.6. Evaluation des indices de diversité des CMA

Les paramètres envisagés ont été : le nombre de spores par gramme de sol, l'abondance relative des spores, la richesse spécifique en fonction des sites. La fréquence et l'abondance relatives de chaque espèce ont ensuite permis le calcul des indices de diversité de Shannon Weaver suivant la formule simplifiée proposée par Legendre & Legendre (1984). Elle se définit comme suit : $H = \sum P_i \log_2 P_i$

Où, $P_i = n_i/n$ est la fréquence de l'espèce i dans les sites.

Pour un site donné, la valeur théorique de la diversité maximale (Hmax), correspondant à une répartition égale de tous les individus entre toutes les espèces a été calculée suivant la formule:

$$H_{\max} = \log S$$

Où S représente le nombre d'espèces.

L'équitabilité E a été calculée selon la formule suivante: $E = H/H_{\max}$

Ce paramètre traduit le degré de diversité dans une population et représente une mesure relative permettant des comparaisons entre les sites.

II.2.2. Caractérisation des isolats de *Phakopsora pachyrhizi*

II.2.2.1. Collecte des échantillons et dénomination des isolats

Des descentes sur le terrain ont été effectuées. L'identification de la rouille s'est faite par une observation précise des anomalies phénotypiques par rapport au phénotype normal, (Renard & Foucart, 2008). Les feuilles de soja présentant des symptômes typiques de la rouille asiatique ont été collectées dans les 25 parcelles prospectées. La variété de soja sur laquelle la rouille a été détectée a été notée. Sur chaque site de collecte, la latitude, l'altitude et la longitude ont été enregistrées à l'aide d'un GPS (GPS Map 76S, Garmin). Les échantillons collectés dans chaque site ont été introduits dans des enveloppes et placés dans une glacière contenant de la glace puis ramenés en laboratoire pour isolement. Sur chacune des enveloppes, la dénomination et l'origine de chaque isolat étaient marquées (Tableau IV).

Tableau IV Dénomination et origines des isolats de *Phakopsora pachyrhizi*

ZAE	Localités	Isolats	Variétés
ZAEI	Tokobere	TO	TGX-1448-2E
	Soukoudou	SO	TGX-1448-2E
	Sanguere	SA1	R3
		SA2	R2
		SA3	PANAMA
Mokolo	MO	TGX-1448-2E	
ZAEII	NgaoundéréI	NGI	R2
	NgaoundéréII	NGII	R2
	Mbe	MB	R3
	wack II	WA	TGX-1448-2E
	Ganganssoua	GA1	TGX-1835-10E
		GA2	TGX-1485-1D
GA3		TGX-1448-2E	
ZAEIII	Bangangté	BA1	TGX-1835-10E
		BA2	LOCALE
		BA3	TGX-1835-10E
	Santchou	SAN	TGX-1835-10E
	Bamenda	BAM	TGX-1838-10E
	Diandam	DIA	TGX-1835-10E
	Mbouda	MBO	LOCALE
ZAEIV	LALA	LAL	LOCALE
	Pendja	PEN	LOCALE
ZAEV	Mbalmayo	MBA1	TGX-1835-10E
		MBA2	TGX-1835-10E
	Nkolbisson	NKO	TGX-1991-22F
	Batchenga	BAT	TGX-1835-10E
	Bafia	BAF	TGX-1835-10E
	Mfou	MF1	SCS-1
		MF2	DPSB8
		MF3	TGX-2014-19FM
		MF4	S1140-5-4
		MF5	SOUNG PUNGU
		MF6	SNKGM011
Fougerole	FOU	LOCALE	

II.2.2.2. Isolement et multiplication des isolats

Les pustules présentes sur les parties inférieures des échantillons des folioles malades transportées au laboratoire ont été prudemment brossées séparément à l'aide d'un pinceau fin dans les boîtes de Pétri afin d'obtenir des isolats (Furtado *et al.*, 2008). Ces isolats ont été introduits dans un volume de 20 ml d'eau distillée stérile. La suspension des urédospores obtenues par isolats a été inoculée pour multiplication sur des folioles détachées de soja apparemment saines, introduites dans les boîtes de Pétri contenant un filtre humidifié. Douze jours après ensemencement, les cultures pures

et fructifères de *Phakopsora pachyrhizi* ont été à nouveau brossées séparément et introduit dans des tubes à épindophe et conservées dans un réfrigérateur à 5 °C (Furtado *et al.*, 2008).

II.2.2.3. Description des Morphologies et des Morphométries des urédospores obtenues de chaque isolat

Les différents isolats obtenus ont été montés sur lame et lamelle. Les morphologies des différents isolats en fonction des ZAE ont été obtenues par observation au microscope. Un microscope optique monté avec un objectif micrométrique a été utilisé pour mesurer la taille des urédospores [longueur (L) et largeur (l)] à un grossissement de X 100 (Fig.17). Le rapport longueur/largeur (L/l) a été calculé pour chaque zone agro-écologique (Duan *et al.*, 2008) ; puis une classification des isolats a été effectuée à l'aide d'un dendrogramme.



Fig. 17. Mesure de la longueur et de la largeur des urédospores au microscope optique (grossissement X 100)

II.2.2.4. Evaluation de l'agressivité des isolats de *Phakopsora pachyrhizi* sur les feuilles détachées de soja.

Les folioles détachées de soja apparemment saines ont été collectées en champ sur la variété TGX-1835-10E provenant de l'institut de recherche Agricole pour le développement de Foubot. Ces folioles ont été lavées à trois reprises avec de l'eau distillée, puis placées dans des boîtes de Pétri de 90 mm contenant un papier filtre humidifié. Une suspension de 1ml d'urédospores de concentration 3×10^2 spores par isolats, préalablement calibrée à l'aide de la cellule de malacez a été déposée sur les folioles détachées sur la partie visible (abaxial) en boîte de Pétri à l'aide d'une seringue à raison de trois gouttes par foliole. Trois répétitions ont été réalisées par isolat soit au total 99 boîtes de Pétri. L'agressivité des isolats a été évaluée par intervalle de trois jours selon l'échelle de 1 à 5 préalablement définie à partir de celle établie par Godoy *et al.*, 2006 Où :

1 : pourcentage d'attaque varie de 1 à 20 % ; il ya formation de pustules sans apparition des lésions ;

- 2 : pourcentage d'attaque varie de 21 à 40 % ; apparition des pustules et lésions ;
- 3 : pourcentage d'attaque varie de 41 à 60 % ; apparitions des pustules, des lésions et jaunissement autour des pustules;
- 4 : pourcentage d'attaque varie de 61 à 80 % ; apparitions des pustules, des lésions et formations des taches noirâtres autour des pustules ;
- 5 : pourcentage d'attaque varie de 81 à 100 % ; nécrose totale de la feuille

II.2.3. Criblage de quelques variétés de soja pour leur résistance ou susceptibilité à *Phakopsora pachyrhizi* en champ

II.2.3.1. Dispositif expérimental et conditions de culture

Le dispositif expérimental était un dispositif en blocs de Fisher complètement randomisés à trois répétitions (blocs) (Fig.18). Les blocs (22,5 m x 5 m) étaient constitués de 43 lignes espacées entre elles par une distance de 0,5 m et entre les blocs d'une distance de 1 m. Les lignes représentaient les variétés. Ces variétés ont été semées manuellement 3 jours après le labour, avec un écartement de 0,5 m entre les lignes et de 0,5 m entre les poquets (soit 68 800 plantes/ha). Chaque ligne était constituée de 9 poquets soit 18 plantes par ligne. Un sarco-buttage a été effectué manuellement à 3 et 6 semaines après semis (SAS). Aucun traitement fongique ni de fertilisant n'ont été appliqués au cours de l'expérimentation. La contamination de la parcelle s'est faite de manière naturelle par l'agent pathogène.

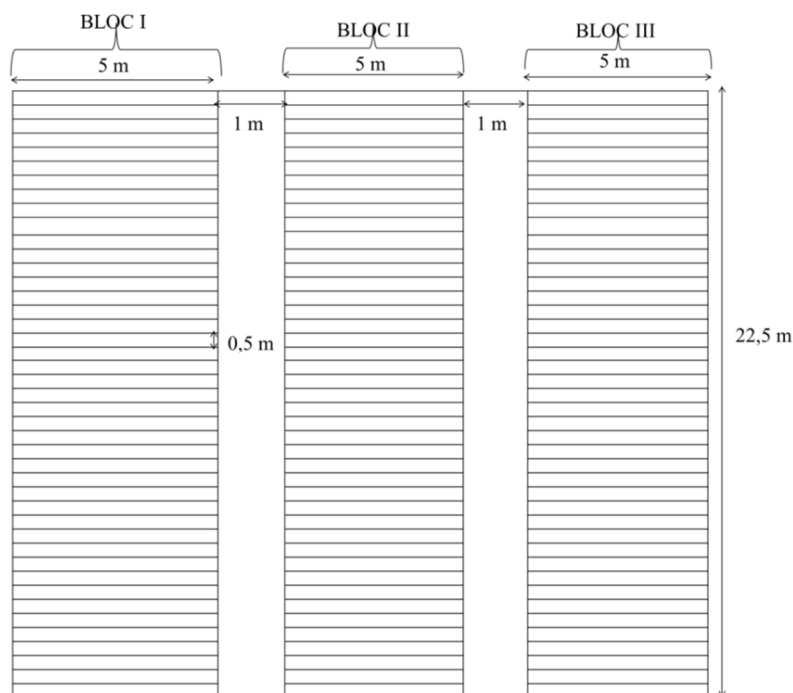


Fig. 18. Dispositif expérimentale de criblage variétal

II.2.3.2. Evaluation de l'incidence et de la sévérité de la rouille asiatique du soja

II.2.3.2.1. Evaluation de l'incidence

Les plantes identifiées comme malades ont été dénombrées et étiquetées. La prise des paramètres de la maladie avait lieu toutes les deux semaines à partir de la sixième semaine après semis. L'incidence de la maladie, qui désigne la proportion des plantes malades au sein d'une unité expérimentale donnée, indépendamment de la gravité de l'attaque de chaque plante, a été déterminée en adoptant la formule usuelle en pathologie végétale décrite par Tchoumakov & Zaharova (1990), suivantes :

$$I (\%) = \frac{n}{N} \times 100.$$

Où ; N Représente le nombre total de plante par unité expérimentale; n le nombre de plantes malades et I (%) la fréquence de la maladie sur la parcelle.

II.2.3.2.2. Evaluation de sévérité

Les plantes malades ont été dénombrées, étiquetées et les degrés d'infections leur ont été attribués. La quantification de la maladie s'est faite par ligne en fonction du temps. La prise de la sévérité de la maladie s'est effectuée toutes les deux semaines à partir de la sixième semaine après semis. La sévérité de la maladie mesure la quantité de maladie sur un organe de la plante ou sur une plante entière. C'est le degré d'attaque d'un organe ou de la plante entière par la maladie. Elle a été exprimée par la formule décrite par Tchoumakov & Zaharova (1990).

$$S = \sum \frac{(a \times b)}{n} \times 100$$

Où : $\sum (ab)$ est la somme des multiplications du nombre des plantes malades (a) avec le degré d'infection correspondant (b) donné en %; et n le nombre de plantes malades. L'échelle utilisée pour estimer le degré d'infection est celle proposée par Wangungu *et al.* (2011).

Tableau V. Echelle d'estimation des degrés d'infection (Wangungu *et al.*, 2011)

Code	Marge de sévérité (%)	Description
1	(0 %)	Absence totale de symptômes
2	(1-15 %)	Infection occupant moins de la moitié de la surface foliaire
3	(16-40 %)	Infection couvrant les trois quarts de la superficie foliaire
4	(41-75 %)	Infection recouvrant plus de trois quarts de la surface des feuilles
5	(76-100 %)	Infection couvrant entièrement la superficie foliaire, feuilles complètement déformées ou mortes à cause de la maladie.

II.2.3.3. Estimation du rendement des variétés de soja

Les gousses matures et à moitié sèches par variété ont été récoltées, introduites dans des enveloppes, puis séchées à l'étuve (marque Selecta) jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Après décorticage, les graines obtenues ont été pesées à l'aide d'une balance de précision (0.01g) de marque

Sotorius. Les rendements des variétés ont été estimés à l'hectare suivant la formule de Svecnjak *et al.* (2006) :

$$Rdt = \frac{PGEp \times N}{S} \times 10000 \text{ ou}$$

PGEp = poids des grains secs de soja par pied,

N = nombre de pieds de soja par parcelle élémentaire traitée

S = superficie de chaque parcelle élémentaire traitée (m²)

10000 m² = 1 hectare

II.2.4. Evaluation de l'effet des isolats de CMA sur le développement de la rouille du soja en serre après inoculation artificielle et en champ après inoculation naturelle

II.2.4.1. Dispositifs expérimentaux

Un même dispositif a été utilisé sous ombrière et en champ, à la seule différence que dans la serre les seaux de cinq litres ont été utilisés (Fig.19) et les conditions du milieu étaient contrôlées. Le dispositif utilisé était un dispositif double factoriel de type split plot constitué de trois blocs. Les variétés (TGX-1835-10E (V1), R3(V2)) constituaient le facteur principal et les traitements (T0⁺, T0⁻, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14) le facteur secondaire. Chaque bloc a comporté 16 parcelles séparées chacune en deux sous parcelles et l'essai comptait au total 48 parcelles élémentaires. Chaque parcelle mesurait 4 m de longueur et 1,5 m de largeur soit une superficie de 6 m². Ces parcelles représentaient les différents traitements testés et V₁, V₂ les variétés. La distance entre les blocs, les parcelles et les sous parcelles ont été respectivement de 2, 1 et 1 m (Fig.20).

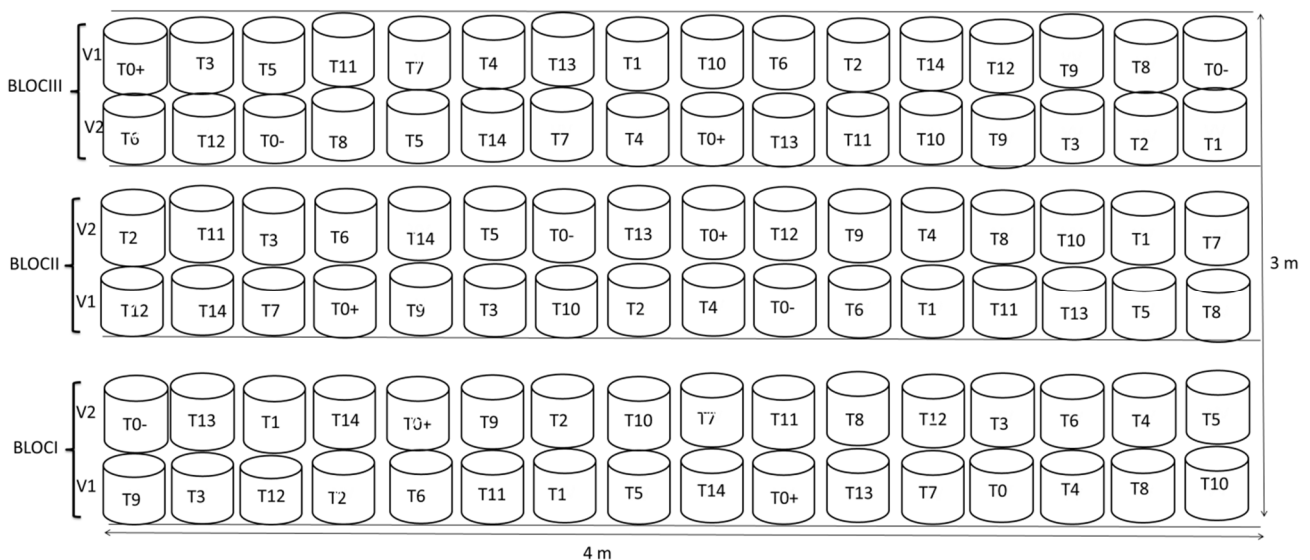


Fig. 19. Dispositif expérimental en serre.

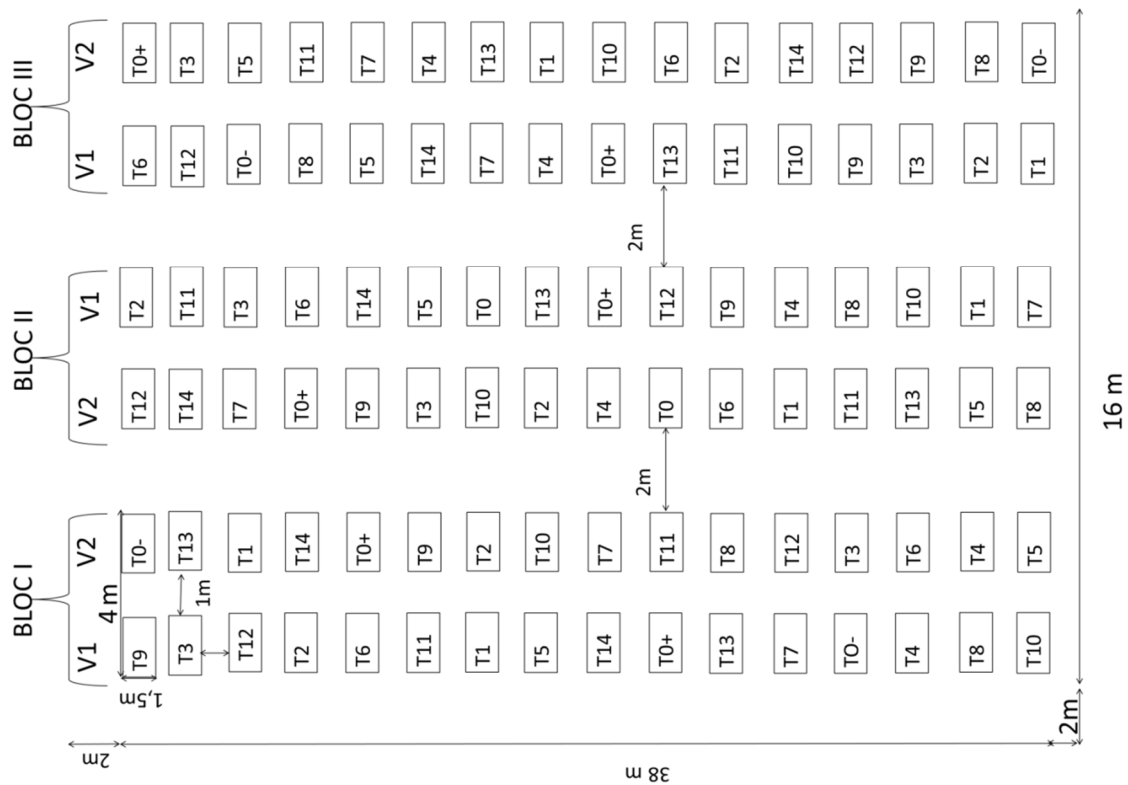


Fig. 20. Dispositif expérimental en champ.

T0: témoin négatif; T0⁺: traitement fongicide; T₁: *Gigaspora gigantea*, T₂: *Denticutata nigra*, T₃: *Entrophopora*, T₄: *Scutellospora Cerradessis*, T₅: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra*, T₆: *Gigaspora gigantea* + *Entrophopora*, T₇: *Gigaspora gigantea* + *Scutellospora Cerradessis*, T₈: *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₉: *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₀: *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₁: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₁₂: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₃: *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₄: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*.

II.2.4.2. Semis, Inoculation des CMA et entretien

Les graines ont été semées manuellement en ligne à l'aide d'un semoir à main. Dans chaque poquet 2 à 3 graines de soja ont été introduites à une profondeur d'environ 3 cm. La distance entre deux poquets voisins et entre deux lignes voisines était de 50 cm soit une densité moyenne de 3329 pieds/ 520,125 m² soit environ 64003 pieds/ ha.

L'inoculation des CMA s'est effectuée lors du semis en pot des graines de soja (Ouahmane *et al.*, 2006). Ceci en raison d'environ 1000 spores par 100 g de substrat. Les opérations d'entretiens ont consisté en serre à un arrosage hebdomadaire. Afin de réduire la concurrence des adventices pour des besoins en eau, lumière, nutrition et réduire la pression de la maladie, le désherbage manuel et le binage ont été effectués respectivement à la quatrième et huitième semaine après semis en champ.

II.2.4.3. Evaluation des paramètres de croissances en fonction des traitements (CMA)

L'étude des paramètres de croissance (hauteur de la tige, diamètre au collet et nombres de feuilles) s'est faite en étiquetant 10 plantes par sous parcelle et par variété soit 30 plantes par traitement pour chaque variété en champ. En serre elle a été effectuée sur la quasi-totalité des plantes des différents traitements. La hauteur de la tige, a été mesurée à l'aide d'une règle graduée ; le diamètre au collet mesuré à l'aide d'un pied à coulisse ; puis le comptage des feuilles s'est fait pour chaque plante échantillonnée. Ces différents paramètres suscités ont été évalués toutes les deux semaines durant la période d'observation, ceci à partir de la sixième semaine après semis. Les moyennes ont été déterminées et comparées entre elles, par traitement par rapport au témoin négatif (T0⁻) et au traitement au fongicide (T0⁺).

II.2.4.4. Evaluation de l'effet de CMA sur les paramètres de la maladie

II.2.4.4.1. Evaluation de l'incidence

L'inoculation du pathogène en serre s'est effectuée à la quatrième semaine après semis (Fig. 21), avec une suspension de 3×10^2 urédospores par goutte d'inoculum. En champ l'inoculation s'est faite de manière naturelle. Le traitement fongicide quant à lui a été appliqué en champ et en serre dès l'apparition des premiers symptômes de la maladie à la sixième semaine après semis à la dose de 5,33 g/L et répété toutes les deux semaines jusqu'à la maturité.



Fig. 21. Inoculation d'inoculum de *Phakopsora pachyrhizi* en serre.

Les plantes par sous parcelle ont été comptés et notés. Les plantes identifiées comme malades ont été dénombrées et étiquetées. La prise des paramètres de la maladie a eu lieu toutes les deux semaines à partir de la sixième semaine après semis. L'incidence de la maladie, qui désigne la proportion des plantes malades au sein d'une unité expérimentale donnée, indépendamment de la

gravité de l'attaque de chaque plante, a été déterminée en adoptant la formule usuelle en pathologie végétale décrite par Tchoumakov & Zaharova (1990).

$$I (\%) = \frac{n}{N} \times 100.$$

Où ; N Représente le nombre total de plante par unité expérimentale; n le nombre de plantes malades et I (%) la fréquence de la maladie sur la parcelle.

II.2.4.4.2. Evaluation de la sévérité

Les plantes malades ont été dénombrées, étiquetées, et des degrés d'infection leur ont été attribués. La quantification de la maladie s'est faite par traitement en fonction du temps. La prise de la sévérité de la maladie s'est effectuée toutes les deux semaines à partir de la sixième semaine après semis. La sévérité de la maladie mesure la quantité de maladie sur un organe de la plante ou sur une plante entière. C'est le degré d'attaque d'un organe ou de la plante entière par la maladie. Elle a été exprimée par la formule décrite par Tchoumakov & Zaharova (1990).

$$S = \frac{\sum (a \times b)}{n} \times 100$$

Où : $\sum (ab)$ est la somme des multiplications du nombre des plantes malades (a) avec le degré d'infection correspondant (b) donné en %; et n le nombre de plantes malades.

L'échelle utilisée pour le degré d'infection (b) est celle proposée par Wangungu *et al.* (2011) où 1: 0 % d'infection de la plante; 2 : infection recouvrant entre 1 - 15 % de la plante; 3 : infection recouvrant entre 16 - 40 % de la plante; 4 : infection recouvrant entre 41 - 75 %; 5 : infection recouvrant 76 % - 100 % de la plante.

II.2.4.5. Evaluation des paramètres de mycorhization sur le développement de la maladie

II.2.4.5.1. Echantillonnage et détermination du degré de colonisation mycorhizien

Les racines des différents traitements par variété et par site en champ et en serre ont été collectées en fin de culture et introduites séparément dans des enveloppes puis transportées en laboratoire où elles ont été nettoyées et conservées dans de l'alcool à 50 %.

Environ 1 g de ces racines a été découpé en petits fragments de 1 à 2 cm, et introduit dans des tubes à essai contenant une solution d'hydroxyde de potassium à 2,5 % et porté au bain marie à 90 °C pendant 15 min. la solution d'hydroxyde de potassium a été éliminée des tubes sans rinçage des racines. Cette solution a permis en effet, de détruire le cytoplasme des cellules végétales, des inclusions et la majorité des pigments pariétaux en laissant intact les structures racinaires et fongiques. Par la suite environ 10 ml de peroxyde d'hydrogène 20 volume ont été ajoutés dans les tubes pendant 5 minutes (Birhane *et al.*, 2010), afin de retirer une quantité de pigments racinaires.

Les racines ont été rincées à l'eau distillée, à trois reprises, puis acidifiées dans la solution d'acide chlorhydrique à 10 % pendant 15 à 20 minutes. La coloration proprement dite a consisté à imbiber les fragments de racines ainsi traités d'une solution contenant le glycérol (500 ml), l'eau distillée (450 ml) l'acide chlorhydrique 1 % (50 ml) et du bleu de méthyl (0,01 g) pendant 24 heures à température ambiante. Les racines ont été enfin décolorées dans une solution identique à la solution de coloration mais dépourvue de colorant (le bleu de méthyl) pendant 1 heure. Après décoloration de fragments de racines, seules les structures des CMA restent en générale colorées. Ces fragments de racines décolorés ont été montés sur lames et lamelles et observés au microscopique optique.

II.2.4.5.2. Evaluation des paramètres de la mycorhization en serre et en champ

L'évaluation du statut qualitatif et quantitatif de la colonisation mycorhizienne des racines a été réalisée par observation de 30 fragments racinaires (par traitement, variété et site) montés entre lame et lamelle en raison de 10 fragments par lame (Fig. 22) selon la technique de Trouvelot *et al.* (1986).



Fig. 22. Fragments racinaires montés entre lames et lamelles.

L'identification des structures des CMA présentes dans la racine par observation microscopique, a permis de les annoter selon un barème de classification et d'estimation de 0 à 5 (Fig.23.). Cette technique a permis de calculer deux paramètres d'infection endomycorhizienne :

- la fréquence de mycorhization (F %), définie comme le pourcentage de fragments racinaires mycorhizés par rapport au nombre total de fragments observés ;

$$F (\%) = (n/N) \times 100$$

- l'intensité de mycorhization globale (M % ou I %) correspondant à la proportion de fragments racinaires observés colonisés par le CMA. Chaque fragment analysé a alors été placé dans une classe d'identité de mycorhization allant de 0 à 5 selon la densité des hyphes. M ou I (%) = $(95 \times n_5) + (70 \times n_4) + (30 \times n_3) + (5 \times n_2 + n_1) / N$. Avec n_5 , n_4 , n_3 , n_2 et n_1 , les nombres de fragments de degré de colonisation 5, 4, 3, 2 et 1 respectivement. Avec

N : Nombre de fragments observés ; n : nombre de fragments mycorhizés

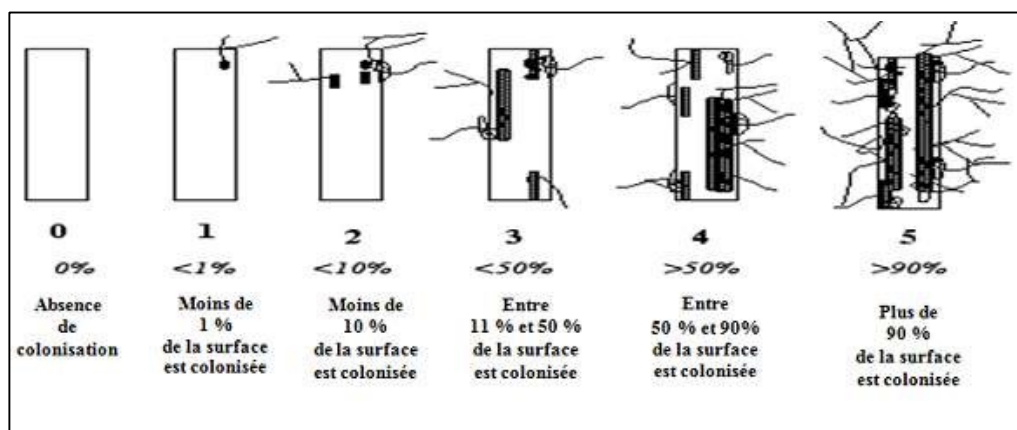


Fig. 23. Echelle d'évaluation de la colonisation racinaire (Trouvelot *et al.*, 1986).

II.2.4.6. Evaluation de l'effet des CMA sur le rendement en serre et en champ

Les gousses matures à moitié sèches des plantes étiquetées par parcelle élémentaire, par variétés et par site ont été récoltées. Ces gousses ont été introduites dans des enveloppes, puis séchées à l'étuve (marque Selecta) jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Après décorticage, les graines obtenues ont été pesées à l'aide d'une balance de précision (0,01g) de marque Sotorius. Les rendements des variétés ont été estimés à l'hectare selon la formule de Svecnjak *et al.* (2006), ci contre :

$$\text{Rdt} = \frac{\text{PGEP} \times \text{N}}{\text{S}} \times 10000 \text{ O\`u :}$$

PGEP = poids des grains de soja par pied,
N = Nombre de pieds de soja par *parcelle élémentaire traitée*,
S = superficie de chaque parcelle élémentaire traitée
10000 m² = 1 hectare

II.2.4.7. Evaluation de l'effet de la mycorhization sur la synthèse des composés biochimiques et l'activité enzymatique en serre et en champ

II.2.4.7.1. Evaluation de l'effet de la mycorhization sur la synthèse des composés biochimiques

II.2.4.7.1.1. Extraction et dosage des composés phénoliques

II.2.4.7.1.1.1. Extraction

Les folioles des plantes mycorhizés aux traitements T6 ayant enregistré des faibles sévérités de la maladie en serre et en champ, les folioles des traitements aux fongicides et témoins négatif des différentes variétés à 8 semaines après sémis ont été prélevés pour extraction, dosage et analyse de ses composés par HPLC-MS.

L'extraction des composés phénoliques totaux a été effectuée selon le protocole utilisé par Tene *et al.* (2017). Un g de matériel végétal a été broyé à 4 °C dans 5 mL de méthanol 80 % (v/v). L'homogénat a été centrifugé à 10000 x g pendant 5 min à température ambiante à l'aide du

« Beckmann-Coulter microfuge 20 R centrifuge ». Le surnageant a été récupéré et le culot suspendu dans 3 mL de méthanol 80 °C puis, une autre centrifugation s'en est suivie. Les surnageants récupérés ont été mélangés et la solution obtenue constituait l'extrait de composés phénoliques totaux qui a été conservé à -20 °C pour usage ultérieur.

II.2.4.7.1.1.2. Dosage quantitatif des composés phénoliques totaux

La quantité de composés phénoliques a été déterminée d'après le protocole décrit par Marigo *et al.* (1973) utilisant le réactif de Folin-ciocalteu.

- Principe

Le réactif de Folin-Ciocalteu qui est un acide fort constitué d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et de phosphomolibdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$), est réduit en milieu alcalin et à chaud lors de l'oxydation des composés phénoliques en un mélange bleu d'oxyde de tungstène (W_8O_{23}) et de molybdène (Mo_8O_{23}) dont l'absorbance à 760 nm est proportionnelle à la quantité de composés phénoliques présentés dans l'extrait.

- Mode opératoire

Dans un tube à essai, ont été introduits successivement : 10 μ L d'extrait; 500 μ L d'eau distillée; 75 μ L de réactif Folin-ciocalteu; 500 μ L Na_2CO_3 à 20 %. Le mélange obtenu a été incubé au bain-marie à 40 °C pendant 30 min et l'intensité de la coloration bleue a été mesurée au spectrophotomètre (Shimadzu UV-1605, UV-visible) à 760 nm contre un blanc dans lequel l'extrait a été remplacé par l'eau distillée. Pour chaque extrait trois répétitions ont été réalisées. La teneur en composés phénoliques a été exprimée en μ g/g de matière fraîche (MF) en référence à la courbe établie avec l'acide gallique (0,1 mg/mL).

II.2.4.7.1.1.3. Dosage quantitatif des flavonoïdes

La quantité de composés phénoliques flavonoïdes a été déterminée selon le protocole modifié de Kramling & Singleton (1969) utilisant le formaldéhyde et le réactif de Folin-ciocalteu.

- Principe

En milieu acide (2 μ L HCL 50 %), le formaldéhyde (2 μ L, 8 mg/l) se fixe aux molécules flavonoïdiques, il en résulte la formation en solution de complexes qui précipitent du fait de leur fort poids moléculaire. Le dosage des composés non flavonoïdes a été réalisé dans le surnageant par la méthode de Marigo *et al.* (1973). La teneur en flavonoïdes a été obtenue par la différence entre les phénols totaux et les non flavonoïdes.

- Mode opératoire

Le milieu réactionnel contenait: 400 μ L d'extrait phénolique; 200 μ L HCL (50 %); 200 μ L de formaldéhyde (8mg/L). Le milieu a été incubé 15 min à 4 °C, centrifugé pendant 5 min à 3000 x g et

le surnageant a été récupéré. Il s'en est suivi le dosage des non flavonoïdes dans le surnageant. La teneur en flavonoïdes est déterminée selon la formule :

$$T_{\text{flavonoïdes}} = T_{\text{phénol totaux}} - T_{\text{non flavonoïdes}}$$

II.2.4.7.1.1.4. Dosage quantitatif des tannins

La quantité de composés phénoliques tannins a été déterminée selon le protocole modifié de Schofield *et al.* (2001) utilisant le polyvinyle pyrrolidone (PVP) et le réactif de Folin-ciocalteu.

- Principe

En milieu aqueux, le PVP forme des liaisons avec les tannins et il en résulte un complexe tannin/PVP qui précipite par centrifugation. Le dosage des composés non tannins est réalisé dans le surnageant par la méthode de Marigo *et al.* (1973). La teneur en tannins est déduit par la différence entre les phénols totaux et les composés non tannins.

- Mode opératoire

Le milieu réactionnel contenait : 200 μ L de PVPP (25 mg/mL); 200 μ L d'extrait phénolique. Le mélange a été homogénéisé, incubé 15 min à 4 °C et centrifugé pendant 10 min à 3000 x g puis le surnageant a été récupéré. Il s'en est suivi le dosage des non tannins dans le surnageant par la méthode de Marigo *et al.* (1973) décrit ci-dessus.

La teneur en tannins est déterminée selon la formule :

$$T_{\text{tannins}} = T_{\text{phénol totaux}} - T_{\text{non tannins}}$$

II.2.4.7.1.1.5. Extraction et dosage des protéines

II.2.4.7.1.1.6. Extraction

L'extraction des protéines a été réalisée selon le protocole modifié de Pirovani *et al.* (2008). En effet, 1 g de matériel végétal a été broyé à 4 °C dans 5 ml de tampon tris-maleate (10 mM, pH 7,2). Après broyage, le broyat a été homogénéisé pendant 2 min à 4 °C et centrifugé pendant 25 min à 10000 g à 4 °C à l'aide de la centrifugeuse «Beckmann-Coulter microfuge 20 R». Le surnageant a été recueilli et conservé tandis que le résidu était re-suspendu dans 3 mL de tampon et centrifugé de nouveau à 20000 x g pendant 20 min à 4 °C. Le mélange des surnageants obtenus constitue l'extrait protéique qui a été conservé à -20 °C pour des utilisations ultérieures.

II.2.4.7.1.1.7. Dosage quantitatif des protéines

Le dosage des protéines totales dans les extraits obtenus a été réalisé selon la méthode de Bradford (1976).

- Principe

C'est une méthode de détermination de la concentration des protéines basée sur la réaction colorimétrique entre les protéines et le réactif de Bradford (bleu de Coomassie G250) de coloration

brune claire. En effet, en présence des protéines, le bleu de Coomassie G250 réagit avec les résidus hydrophobes d'acides aminés des protéines induisant ainsi un changement de coloration du milieu réactionnel qui vire au bleu absorbant à 595 nm et l'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité des résidus protéiques dans le milieu.

- Mode opératoire

Dans chaque tube à essai, ont été introduits successivement : 10 L d'extrait; 490 L d'eau distillée et 500 L de réactif de Bradford. Le mélange a été incubé à température ambiante à l'obscurité pendant 15 min et la densité optique (D.O) a été mesurée à 595 nm à l'aide du spectrophotomètre (Shimadzu UV-1605, UV-visible), contre un contrôle (blanc) dans lequel l'extrait a été remplacé par de l'eau distillée. Pour chaque extrait, l'expérience a été réalisée en tripliqué et les concentrations en protéines présentes ont été exprimées en g en équivalence de BSA/g de matière fraîche (MF) en référence à une extrapolation sur la courbe d'étalonnage réalisée dans les mêmes conditions que les échantillons en utilisant le BSA (*Bovine Serum Albumine*) à 0,1 mg/mL.

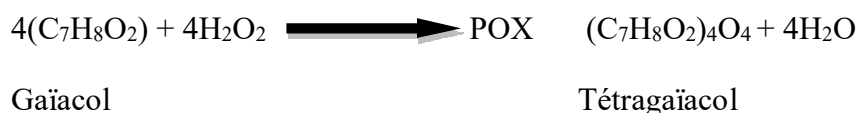
II.2.4.7.2. Evaluation de l'effet des CMA sur l'activité enzymatique

II.2.4.7.2.1. Mesure de l'activité des peroxydases

Le dosage de l'activité peroxydasique dans l'extrait protéique a été réalisé selon le protocole modifié de Baaziz *et al.* (1994).

- Principe

Il repose sur l'oxydation du gaïacol par les peroxydases en tétragaïacol en présence de H₂O₂ selon la réaction suivante :



- Mode opératoire

Le milieu réactionnel contenait: 925 µL de tampon Tris-Maléate (10 mM, pH 7,2 et contenant 1 g de gaïacol); 25 µL d'extrait protéique et 50 µL de H₂O₂ 10 %. Le mélange a été incubé à température ambiante pendant 3 min et en suite, l'activité a été mesurée en suivant la formation du tétragaïacol à 470 nm à l'aide du spectrophotomètre (Shimadzu UV-1605, UV-visible) contre le blanc où ont été introduites 25 µL d'eau distillée en remplacement de l'extrait protéique. L'activité enzymatique a été exprimée en unité enzymatique par gramme de matière fraîche (Abs à 470 nm/min/g de matière fraîche) et calculée selon la formule ci-dessous :

$$AE = \frac{\Delta \text{Abs}}{\Delta t * \text{MF}}$$

Avec : Abs=Absorbance ; t= temps ; MF= masse de la matière fraîche ; Δ= variation.

II.2.4.7.2.2. Mesure de l'activité de la Polyphénoloxydase:

L'activité de la polyphénoloxydases (PPO) a été évaluée dans l'extrait protéique d'après le protocole de VanKammenn et Broumer, (1994) en utilisant la catéchine comme substrat.

- Mode opératoire

Le milieu réactionnel contenait : 500µL de tampon phosphate 0,66 M et de pH 7 ; 150µL de catéchine 10 mM et 35µL d'extrait protéique. Le mélange a été incubé à 25 °C pendant 30 s et le changement de l'absorbance à 330 nm a été mesuré après cinq minutes à l'aide du spectrophotomètre (Shimadzu UV-1605, UV-visible). L'activité enzymatique a été exprimée en Abs330/min/g de matière fraîche contre le blanc où l'extrait a été remplacé par de l'eau distillée. L'activité enzymatique a été calculée d'après la formule ci dessous

$$AE = \frac{\Delta Abs}{\Delta t * MP}$$

II.2.4.7.2.3. Mesure de l'activité de la β -1,3-glucanase

L'activité béta-1,3-glucanase a été évaluée dans l'extrait protéique selon le protocole modifié de Leelasuphakul (2006) utilisant la laminarine 0,0025 % (g/mL) qui est un polymère de β -1,3-glucane.

- Principe

L'enzyme libère le glucose qui est quantifié et l'activité béta-1,3-glucanase est exprimé en µmole de glucose libéré /min/g de protéines.

- Mode opératoire

Dans les tubes à essai, ont été introduit successivement : 90 µl du tampon acétate de sodium pH 4, 0,1 M contenant la laminarine (25mg/L) et 10 µl d'extraits protéiques.

Après avoir ajouté l'extrait protéique, le mélange a été incubé pendant 10 min à 40 °C au bain-marie puis, 200 µl de HCl 2 M ont été ajoutés pour arrêter la réaction. Le volume a été complété avec 900 µl d'eau distillée et la densité optique mesurée à 540 nm contre le blanc où l'extrait protéique a été remplacé avec de l'eau distillée.

La quantité de sucre libéré a été calculée à partir de la courbe standard du glucose (DO = f (concentration en glucose)) et l'activité enzymatique exprimée en µmole de glucose libéré /min /g de Matière Fraiche.

II.2.4.7.3. Analyse chromatographique liquide à haute pression couplée à la spectrométrie de masse des composés phénoliques.

Les spectres de masse à haute résolution ont été obtenus avec un spectromètre QTOF (Bruker, Allemagne) équipé d'une source HESI. Le spectromètre a été utilisé en mode positif (plage de masse

: 100 - 1500, avec une vitesse de balayage de 1,00 Hz) avec un contrôle automatique du gain pour fournir des mesures de masse de haute précision avec un écart de 0,40 ppm en utilisant du formate de sodium comme agent d'étalonnage. Les paramètres suivants ont été utilisés pour les expériences : tension de pulvérisation (4,5 kV), température capillaire (200 °C). L'azote a été utilisé comme gaz de gaine (10 l/min). Le spectromètre a été relié à un système UHPLC Ultimate 3000 (Thermo Fisher, USA) consistant en une pompe LC, un détecteur à barrette de diodes (DAD) (λ :190-600 nm), un échantillonneur automatique (volume d'injection de 10 ml) et un four à colonne (40 °C). Les séparations ont été réalisées en utilisant un Synergi MAX-RP 100A (50 x 2 mm, taille des particules 2,5 μ) avec un gradient d'eau (+0,1 % HCOOH) (A)/acetonitrile (+0,1 % HCOOH) (B) (débit 500 μ l/min, volume d'injection 10 μ l). Les échantillons ont été analysés à l'aide du programme de gradient décrit ci-contre : 95 % A isocratique pendant 1,5 min ; gradient linéaire à 100 % B pendant 6 min; après 100 % B isocratiquement pendant 2 min. Le système est revenu à son état initial (90 % A) dans 1 min et a été équilibré pendant 1 min.

L'acide caféique et l'épicatéchine ont été utilisés comme molécules de référence. Ces derniers ont été traités dans les mêmes conditions expérimentales similaires aux échantillons test. La structure probable des composés a été déterminée par consultation des bases de données ("Chemistry analysis data base, Science Finder", articles et thèses en ligne)

II.2.4.7.4. Analyse statistique des données

Les données relevées pour les différents paramètres étudiés ont été organisées à l'aide du tableur 'EXCEL 2010 (Microsoft office). Ces données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un et à deux facteurs à l'aide du logiciel R version 3.5.1. Le test de Tukey et Last Significant difference (LSD) à la probabilité de $P < 0,05$ ont été utilisés pour la comparaison des moyennes lorsque les données testées suivaient une loi normale (Test de Shapiro-Wilk; $P > 0,05$) et l'homogénéité de variance (Test de Levene, $P > 0,05$). Le test de kruskal-wallis a été utilisé lorsque les données ne suivaient pas une loi normale. Les analyses en composantes principales (ACP), les dendrogrammes, les corrélations de Pearson entre les différents paramètres biochimiques (phénol, flavonoïdes, Tannins, protéines, Glucanases, polyphénoloxydases et peroxydases), le rendement, les paramètres de mycorhization (fréquence et intensité), les paramètres épidémiologiques (incidence et sévérité) et les paramètres de croissance (Hauteur de la tige, nombres de feuilles et Diamètre au collet), ont été réalisés par le logiciel R version 3.5.1.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. RESULTATS

III.1.1. Diversité des CMA dans la rhizosphère des plantes de soja

III.1.1.1. Composition physico-chimique des sols des zones agro-écologiques (ZAE)

L'analyse physico-chimique des sols de la rhizosphère de soja indique que les sols de la ZAE II sont plus acide (4,9), contrairement au sol de la ZAE III (6). Le dosage du taux de phosphore assimilable dans les différentes zone fait état d'une forte valeur dans la ZAE IV (76,76 méq/100g), contrairement à la ZAE II (7,62 méq/100g) qui enregistre une très faible quantité de phosphore assimilable (TableauVI).

Tableau VI. Composition physico-chimique des sols de la rhizosphère de soja par ZAE

ZAE/Eléments	ZAEI	ZAEII	ZAEIII	ZAEIV	ZAEV
Sable	49,5	34,5	52,5	50,5	43,5
Limon	23	27	22	19,5	20,5
Argile	27,5	38,5	25,5	30	36
PH-eau	6	5,6	6,4	6,3	6
PH-KCl	5,1	4,9	6	5,2	5,7
Carbone organique (%)	3,65	3,51	4,35	4,28	3,37
Matière organique (%)	6,29	6,05	7,50	7,26	5,81
Azote total (%)	1,30	0,74	0,85	0,81	1,05
Rapport C/N	28	47	51	52	32
Ca (méq / 100 g)	7,2	4,08	8,72	9,68	10,4
Mg (méq / 100 g)	4,24	2,32	4,8	6,72	6,24
K (méq / 100 g)	0,10	0,10	0,46	0,77	0,33
Na (méq / 100 g)	0,40	0,40	0,40	0,64	0,40
Somme des bases	11,94	6,90	14,39	17,81	17,37
CCE effective	11,94	6,90	14,39	17,81	17,37
S/CECE(%)	100	100	100	100	100
CEC pH 7	14	20	30,56	32	26,24
Saturation base (%)	85	35	47	56	66
P assimilable (méq /100 g)	27,30	7,62	60,21	76,76	25,25

III.1.1.2. Morphotypes des CMA isolés dans la rhizosphère des plantes de soja

Plusieurs morphotypes de spores (16) ont été isolés des 25 échantillons prélevés dans les cinq zones agro-écologiques du Cameroun. Ces spores ont présenté une forte diversité en termes de densité, de couleur, de tailles et des structures caractéristiques (Tableau.VII).

Tableau VII. Description morphologique de différentes spores

Morphotypes	Couleur spores	tailles (m)	Structures ornements	Formes/ observations	Genre
T ₁	blanche	D> 250	BS	Sphériques	<i>Gigaspora</i> sp
T ₂	translucide	D>250	BS	Sphériques	<i>Gigaspora</i> sp
T ₃	blanche	D> 125	HCDSS	Sphériques	<i>Paraglomus</i> sp
T ₄	brune	D> 125	HCDSS	Sphériques	<i>Entrophospora</i> sp
T ₅	translucide clair	D> 250	BS	Spores allongées + dépression	<i>Scutellospora</i> sp
T ₆	jaune	D> 45	HCDSS	Sphériques	<i>Clarodeoglomus</i> sp
T ₇	jaune brillant	D> 45	HCDSS	Sphériques	<i>Rhizophagus</i> sp
T ₈	noire	D> 250	BS	Sphériques	<i>Densticutata</i> sp
T ₉	blanche	D> 125	BS	Sphériques	<i>Scutellospora</i> sp
T ₁₀	marron claire	D> 125	MCSS	Spores allongées + dépression	<i>Scutellospora</i> sp
T ₁₁	jaune claire	D> 250	BS	Sphériques	<i>Gigaspora</i> sp
T ₁₂	marron	D> 125	BS	Sphériques	<i>Densticutata</i> sp
T ₁₃	translucide	D> 125	HCDSS	Sphériques	<i>Diversispora</i> sp
T ₁₄	blanche	D> 250	BS	Sphériques avec	<i>Gigaspora</i> sp
T ₁₅	marron claire	D> 250	BS	Sphériques	<i>Racocetra</i> sp
T ₁₆	marron claire	D> 250	BS	Sphériques	<i>Gigaspora</i> sp

NB. MCSS : Membrane collé au sac sporifère ; HCDSS : Hyphe collé directement au sac sporifère ; PFMD : Présence d'un filament membranaire en dégénérescence ; BS : Bulbe suspenseur

III.1.1.3. Densité des CMA présent dans la rhizosphère du soja dans différentes zones agro-écologiques du Cameroun

Le nombre moyen de spores obtenu après piégeage de la rhizosphère de soja et extraction a varié en fonction des zones agro-écologiques. Des différences significatives ($P < 0,05$) ont été observées entre les zones agro-écologiques (Tableau VIII). Les zones agro-écologiques III et IV ont présenté le nombre de spores le plus élevée par 100 g de sol ; soit respectivement $173,8 \pm 36,52$ et $140 \pm 33,72$; Contrairement aux zones agro-écologiques I et V qui ont enregistré le plus faible nombre de spores par 100 g de sol ($23,6 \pm 6,84$ et $98,2 \pm 14,72$ respectivement)

Tableau VIII. Densité moyenne des spores dans 100 g de sol dans les différentes zones agro-écologiques.

Facteur d'étude	Modalités	Densité moyenne de spores
ZAE	ZAE 1	98,2 ± 14,72b
	ZAE 2	120,4 ± 29,69b
	ZAE 3	173,8 ± 36,52a
	ZAE 4	140,0 ± 33,719ab
	ZAE 5	23,6 ± 6,84c
	Pr(>F)	<0,001***

Les nombres moyens suivis des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes d'après le test de Tukey à la probabilité $P < 0,05$.

La couleur des spores des CMA observées durant les extractions des différents sols de piégeage variait entre les ZAE à savoir : noire, brune, blanche, jaune, hyaline et marron (Fig. 24). L'analyse statistique montre une différence significative ($P < 0,05$) entre les ZAE du point de vue couleurs des spores. Les spores de couleur, brune et hyaline ont été plus denses dans la ZAE II. Celles de couleur blanche ont été plus élevées dans la ZAE IV, tandis que celles de couleur jaune et marron ont été plus importantes dans la ZAE III. Les ZAE II et III ont présenté une densité de spores de différentes couleurs (Tableau IX).

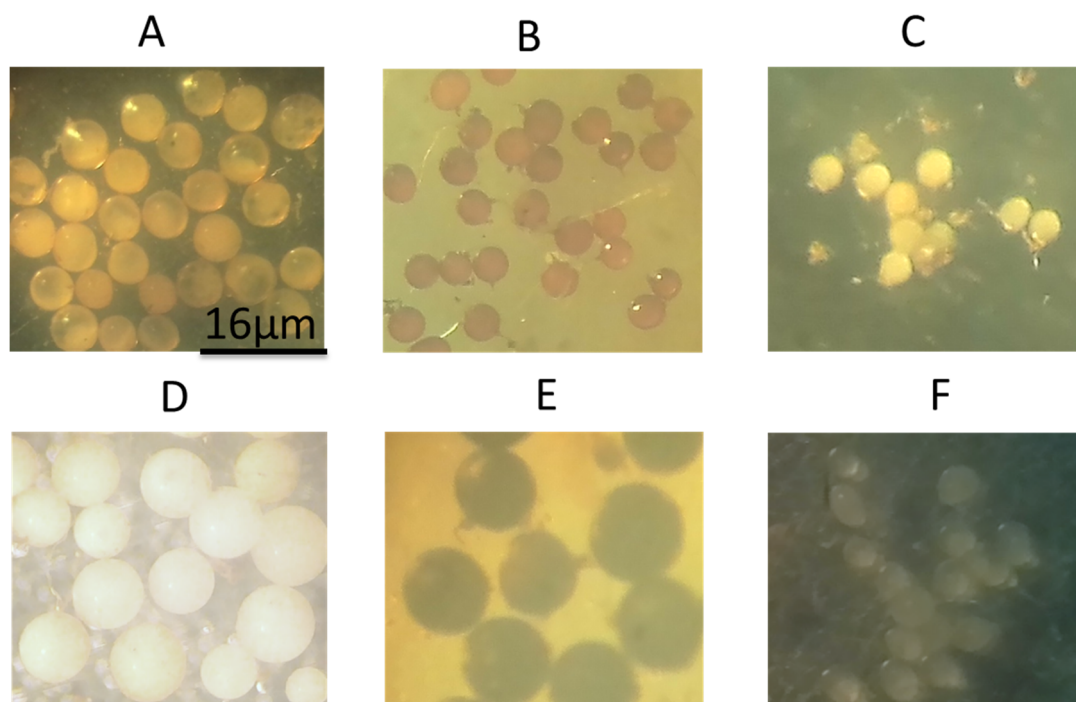


Fig. 24. Différentes spores de la rhizosphère du soja en fonction des couleurs. A: jaune; B: marron; C: brune; D: blanche; E: noire; F: hyalin

Tableau IX. Densités moyennes de spores en fonction des couleurs par ZAE

Facteur d'étude	Modalités	Noires	Brune	Blanche	Jaune	Hyaline	Marron
ZAE	ZAE 1	0b	40,4 ± 7,45bc	12,9 ± 4,2c	44,2 ± 6,93a	0,7 ± 0,44c	0b
	ZAE 2	5,2 ± 1,15a	80 ± 14,7a	9,4 ± 3,07c	1,7 ± 0,27c	21,4±3,93a	2,7 ± 0,74b
	ZAE 3	0,4 ± 0,05 b	33,8 ± 8,59c	31,8±9,78b	55,5±8,04a	14,7±3,81b	37,6±5,77a
	ZAE 4	0,4 ± 0,05 b	51,7 ± 8,16b	65,4 ±12,84a	22,5± 6,33b	0 c	0b
	ZAE 5	0,6 ± 0,13b	6,9 ± 2,51d	5,2 ± 2,86c	2,4 ± 1,73c	8,5±2,34b	0b
	Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***

Les densités moyennes suivies des mêmes lettres sur la même colonne ne sont pas significativement différentes d'après le test de Tukey à la probabilité $P < 0,05$.

La taille des spores obtenues des différents sols de piégeage variaient entre les zones agroécologiques (ZAE) en fonction des mailles de tamis. Le plus grand nombre de spores de tailles >250 µm a été obtenu dans la ZAE II soit $35,2 \pm 5,15$ et le plus faible dans la ZAE I ($1,2 \pm 0,84$). Le plus grand nombre de spores de tailles comprises entre [125-250 µm] a été obtenus dans la ZAE III et le plus faible dans la ZAE V ; Soit respectivement $117,5 \pm 27,77$ et $9 \pm 1,41$ spores. Seules les ZAE III et IV ont enregistré les spores de tailles comprises entre [45-125 µm]. Des différences significatives ($P < 0,05$) ont été observées entre les ZAE et les tailles de spores (Tableau X).

Tableau X. Densités moyennes des spores selon leurs tailles dans les différentes zones agroécologiques.

Facteur d'étude	Modalités	250 µm	125 µm	45 µm
ZAE	ZAE 1	$1,2 \pm 0,84c$	$96,9 \pm 18,35ab$	$0,0 \pm 0,00c$
	ZAE 2	$35,2 \pm 5,15a$	$85,2 \pm 10,03ab$	$0,0 \pm 0,00c$
	ZAE 3	$21,1 \pm 5,86b$	$117,5 \pm 27,77a$	$35,2 \pm 7,30b$
	ZAE 4	$1,5 \pm 0,55c$	$81,5 \pm 17,1b$	$57 \pm 13,05a$
	ZAE 5	$15,5 \pm 3,66b$	$9,0 \pm 1,41c$	$0,0 \pm 0,00c$
	Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

Les densités moyennes suivies des mêmes lettres sur la même colonne ne sont pas significativement différentes d'après le test de Tukey à la probabilité $P < 0,05$

La densité moyenne des spores obtenues varie en fonction des structures caractéristiques à savoir la présence du bulbe suspenseur (BS) ; hyphe collé directement au sac sporifère (HCDSS) ; membrane collée au sac sporifère (MCSS). Le plus de spores à bulbe suspenseur a été obtenu dans la ZAE III et le plus faible dans la ZAE IV; soit respectivement $50,6 \pm 8,03$ et $2,4 \pm 0,9$. Le nombre de spores le plus élevé à hyphe collé directement au sac sporifère (HCDSS) a été obtenu dans la zone agro-écologique IV et le plus faible dans la ZAE V; soit respectivement $137,6 \pm 21,64$ et $7,9 \pm 2,13$. Seule la zone agro-écologique III a possédé des spores avec membrane collée au sac sporifère (MCSS) (Tableau XI). Des différences significatives ($P < 0,05$) existent entre les structures en fonction des ZAE.

Tableau XI. Densités moyennes des spores suivant leurs structures caractéristiques en fonction des zones agro-écologiques. BS : bulbe suspenseur ; HCDSS : hyphe collé directement au sac sporifère ; MCSS : membrane collée au sac sporifère

Facteur d'étude	Modalités	BS	HCDSS	MCSS
ZAE	ZAE 1	$4 \pm 0,71d$	$94,2 \pm 11,80 b$	$0,0 \pm 0,00b$
	ZAE 2	$38,9 \pm 5,51b$	$81,5 \pm 8,17 c$	$0,0 \pm 0,00b$
	ZAE 3	$50,6 \pm 8,03a$	$89,9 \pm 8,82 b$	$33,3 \pm 5,77a$
	ZAE 4	$2,4 \pm 0,90d$	$137,6 \pm 21,64 a$	$0,0 \pm 0,00b$
	ZAE 5	$15,7 \pm 4,20c$	$7,9 \pm 2,13 d$	$0,0 \pm 0,00b$
	Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

Les densités moyennes suivies des mêmes lettres sur la même colonne ne sont pas significativement différentes d'après le test de Tukey à la probabilité ($P < 0,05$).

III.1.1.4. Indices de diversités des champignons mychoriziens à arbuscules dans la rhizosphère du soja

Des différences significatives ont été enregistrées avec la richesse spécifique et l'indice de Shannon-Weiner contrairement à, l'indice de l'équitabilité de piélou (E) qui n'a présenté aucune différence significative entre les ZAE. La richesse spécifique a varié de 3,8 (ZAE II) à 1,8 (ZAE V). Elle a été néanmoins plus élevée dans la ZAE II par rapport aux autres. Les valeurs de l'indice de Shannon-Weiner variaient de 0,35 (ZAE II) à 0,18 (ZAE I). Bien que les indices de piélou n'ont présenté aucune différence significative, il a été noté que l'indice de 0,7 dans la ZAE V tend vers 1; ce qui traduit une diversité plus ou moins équitable en terme d'abondance. Par contre cet indice qui a été de 0,46 (ZAE IV) traduit une distribution non équitable du point de vue de l'abondance des CMA (Tableau XII).

Tableau XII. Indices de diversité des zones agro-écologiques (ZAE)

Facteur d'étude	Modalités	S	H'	E
ZAE	ZAE 1	2,2 ± 0,45b	0,1840 ± 0,06 b	0,538 ± 0,19a
	ZAE 2	3,8 ± 1,1a	0,351 ± 0,08 a	0,628 ± 0,09a
	ZAE 3	2,6 ± 0,55ab	0,242 ± 0,06 ab	0,538 ± 0,12a
	ZAE 4	2,6 ± 0,55ab	0,2920 ± 0,09 ab	0,468 ± 0,12a
	ZAE 5	1,8 ± 0,45b	0,214 ± 0,08 ab	0,708 ± 0,20a
	Pr(>F)	0,0018 **	0,0168 *	0,7418

S : Richesse spécifique ; H' : indices de Shannon Weaver ; E : équitabilité. Les moyens suivis des mêmes lettres sur la même colonne ne sont pas significativement différentes d'après le test de Tukey à la probabilité (P<0,05).

L'observation de la structure des membranes (Fig. 25.) des différents morphotypes a permis de les classer en 9 grands genres, cinq familles, deux ordres, tous appartenant à la classe des Glomeromycetes, dans l'embranchement des Glomeromycota selon la classification de (Oehl *et al.* 2011 et Redecker *et al.* (2013) (Tableau XIII). Globalement, les espèces du genre *Gigaspora* ont été les plus abondantes dans les ZAE avec un pourcentage d'apparition de 88 %, par rapport à celles des *Entrophopora* (52 %), *Scutellospora* (32 %), *Dentiscutata* (36 %), *Rhizophagus* (16 %) *Paraglomus* (20 %), *Clarodeoglomus* (12 %), *Racocetra* (8 %) et *Diversispora* (4 %). Par contre en termes de densité on a noté la dominance des genres *Entrophopora* (45,35 %) *Rhizophagus* (13,55 %) *Scutellospora* (12,14 %) *Gigaspora* (11,72 %) *Paraglomus* (7,52 %) *Clarodeoglomus* (7,25 %) *Dentiscutata* (1,21 %) *Diversispora* (0,82 %) et enfin *Racocetra* (0,432 %).

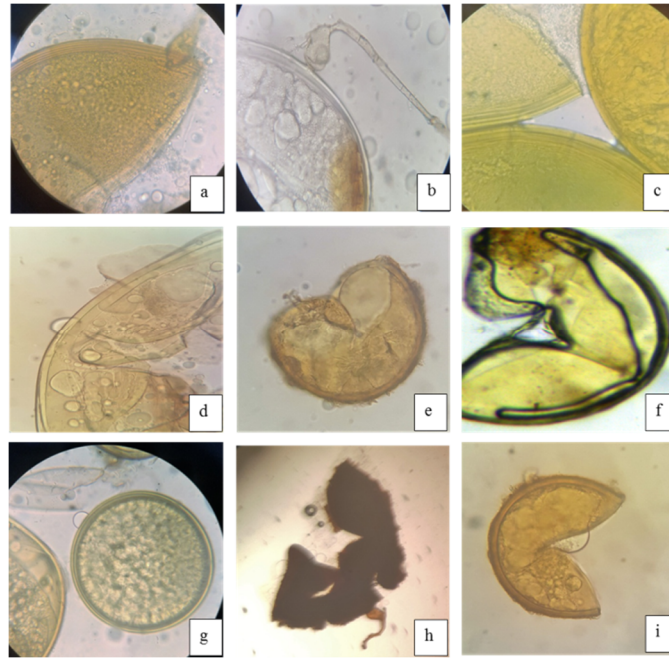


Fig. 25. Différentes membranes des spores observées :

- a. *Gigaspora gigantea* ; b. *Scutellospora scutata* ; c. *Rhizophagus fasciculatus* ; d. *Diversispora trimurales* ; e. *Claroideoglossum etunicatum* ; f. *Paraglossum brasilianum* ; g. *Racocetra verrucosa* ; h. *Dentiscutata nigra* ; i. *Entrophospora infrequens* S.

Tableau XIII. Classification des différents Champignons mycorrhiziens à arbuscules identifiés.

Familles	Genres	Espèces
Gigasporaceae	<i>Gigaspora</i> Gerd. & Trappe, 1974	<i>G. albida</i>
	<i>Gigaspora</i> Gerd. & Trappe, 1974	<i>G. décipiens</i>
	<i>Gigaspora</i> Gerd. & Trappe, 1974	<i>G. gigantea</i>
	<i>Gigaspora</i> Gerd. & Trappe, 1974	<i>G. magarita</i>
	<i>Gigaspora</i> Gerd. & Trappe, 1974	<i>G. rosea</i>
	<i>Dentiscutata</i> Oehl et al., 2008	<i>D. nigra</i>
	<i>Dentiscutata</i> Oehl et al., 2008	<i>D. heterogama</i>
	<i>Racocetra</i> Morton & Msiska, 2009	<i>R. verrucosa</i>
	<i>Scutellospora</i> Walker et Sanders, 1986	<i>S. dipurpurascens</i>
	<i>Scutellospora</i> Walker et Sanders, 1986	<i>S. scutata</i>
Entrophosporaceae	<i>Entrophospora</i> Walker C. & Schübler A. 2010	<i>E. infrequens</i>
	<i>Claroideoglossum</i> Walker C. & Schübler A. 2010	<i>C. etunicatum</i>
	<i>Diversispora</i> Walker et Schübler, 2004	<i>D. trimurales</i>
Glomeraceae	<i>Rhizophagus</i> Gerdemann et Trappe, 1974	<i>R. fasciculatus</i>
Paraglomeraceae	<i>Paraglossum</i> Morton et Redecker, 2001	<i>P. brasilianum</i>

III.1.1.5. Corrélation entre les paramètres chimiques, et le nombre moyen de spores dans les différentes zones

Les résultats obtenus ont montré une corrélation positive entre les différents paramètres chimiques à savoir le pH de l'eau, le phosphore assimilable, la matière organique le pH-KCl et la densité des spores. La densité de spores dans les différentes ZAE a été fortement corrélée à la matière organique avec la valeur de corrélation de 0,76. Ces résultats ont montré également une forte corrélation entre la matière organique et phosphore assimilable (0,89) d'une part, et d'autre part entre la matière organique et le pH de l'eau (Fig. 26.).

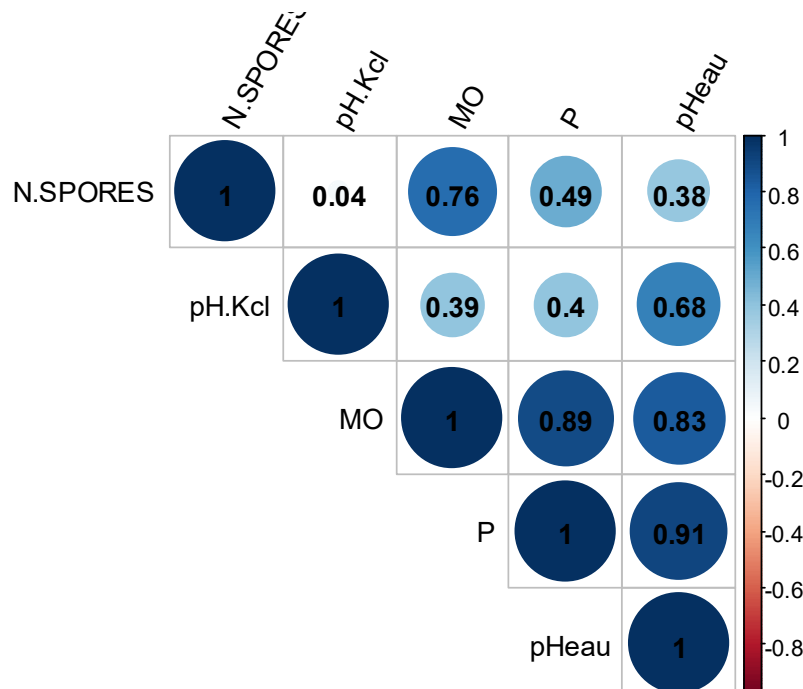


Fig. 26. Corrélation entre les paramètres chimiques et nombre moyen de spores

III.1.1.6. Typologie des zones agroécologiques basée sur les espèces de CMA

L'analyse en composante principale réalisée en fonction des ZAE et des genres des CMA a indiqué une bonne représentation des variables et un bon taux de restitution de l'information sur les axes 1 et 2 (76,9 %). Les résultats ont montré que les composantes principales de l'axe 1 sont représentées par les espèces du genre *Racocetra*, *Denticutata*, *Gigaspora* et *Scutellospora* dans les ZAE II, III, IV. Les composantes principales de l'axe 2 sont représentées par les espèces du genre *paraglomus*, *Entrophopora* et *Clarodeoglomus* dans les ZAE I et IV (Fig.27.).

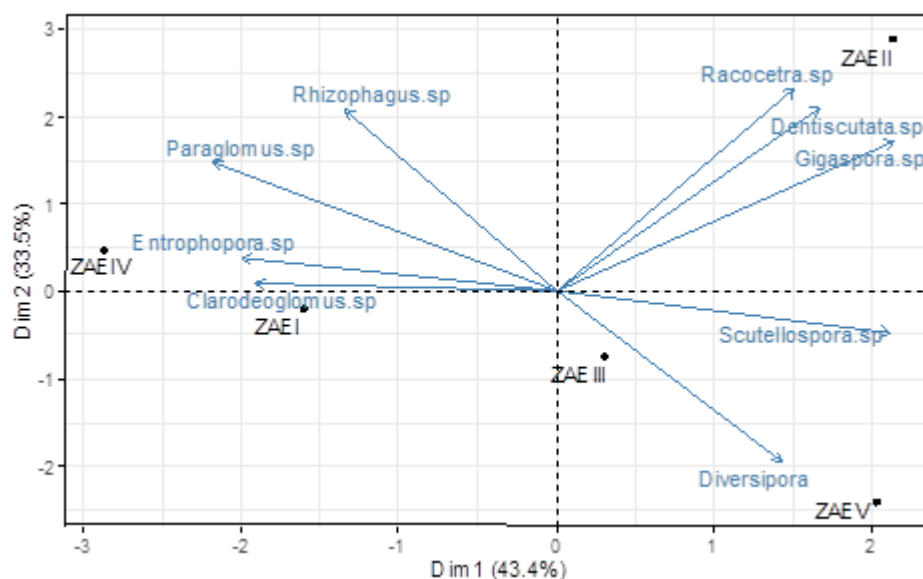


Fig. 27. Analyse en composante principale entre les genres de CMA et des ZAE

III.1.1.7. Fréquence de mycorhization racinaire du soja

La fréquence de mycorhization varie significativement ($P < 0,001$) entre les ZAE, avec une fréquence de mycorhization variant de 14 à 46 % (Tableau.XIV). Les fortes fréquences de mycorhization ont été obtenues dans la ZAE I (46 %) suivie de la ZAE II (44 %). La faible fréquence de mycorhization a été obtenue dans la ZAE IV.

Tableau XIV. Fréquences de mycorhization des ZAE.

Facteurs d'étude	Modalité	F(%)
ZAE	ZAE 1	46 ± 5,47a
	ZAE 2	44 ± 5,47a
	ZAE 3	26 ± 5,47b
	ZAE 4	14 ± 2,64bc
	ZAE 5	22 ± 4,47c
	Pr(>F)	<0,001***

Les fréquences moyennes suivies des mêmes lettres sur la même colonne ne sont pas significativement différentes d'après le test de Tukey à la probabilité ($P < 0,05$).

III.1.1.8. Isolats de CMA choisis

Des 9 grands genres des CMA obtenus, 4 isolats ont été retenues pour évaluer leurs effets en conditions contrôlées et en champ sur le développement de la rouille du soja causé par *phakopsora pachyrhizi*. Ces isolats ont été choisis d'une part sur la base de leurs hibiscus et d'autre part sur la base de leurs performances agronomiques relevées sur la croissance du mil. Il s'agit des espèces *Gigaspora gigantea*, *Entrophopora infrequens*, *Scutellospora scutata*, *Dentiscutata nigra*

III.1.2. Caractéristiques Phénotypiques des isolats de *Phakopsora pachyrhizi* collectés

III.1.2.1. Agent pathogène isolé et nombres isolats collectés

La technique d'obtention d'isolats et de multiplication à partir des pustules développées sur les folioles détachés (Fig. 28A) en boîte de Pétri âgé de 12 jours a permis d'obtenir 34 isolats. Les caractères macroscopiques et microscopiques (Fig. 28 E) des 34 isolats provenant des cinq zones agro-écologiques ont été observés au laboratoire. Les fructifications fongiques ou urédinia (pustules) âgé de 12 jours de culture, étaient de couleur blanchâtre qui changeaient en brunâtre avec l'âge. Ces fructifications se développaient de manière solitaire ou groupée sur les lésions et la plupart d'entre elles étaient dispersées sur la partie inférieure des folioles. Observées au microscope grossissement X 100, ces urédinia à maturité libéraient des urédospores (Fig. 28B), qui par germination et grâce à leur structure spécialisée appressorium (caractéristiques typiques de *P. pachyrhizi*) (Fig. 28 D), pourraient infecter d'autres plantes. La structure de teliospore a également été observée (Fig. 28E).

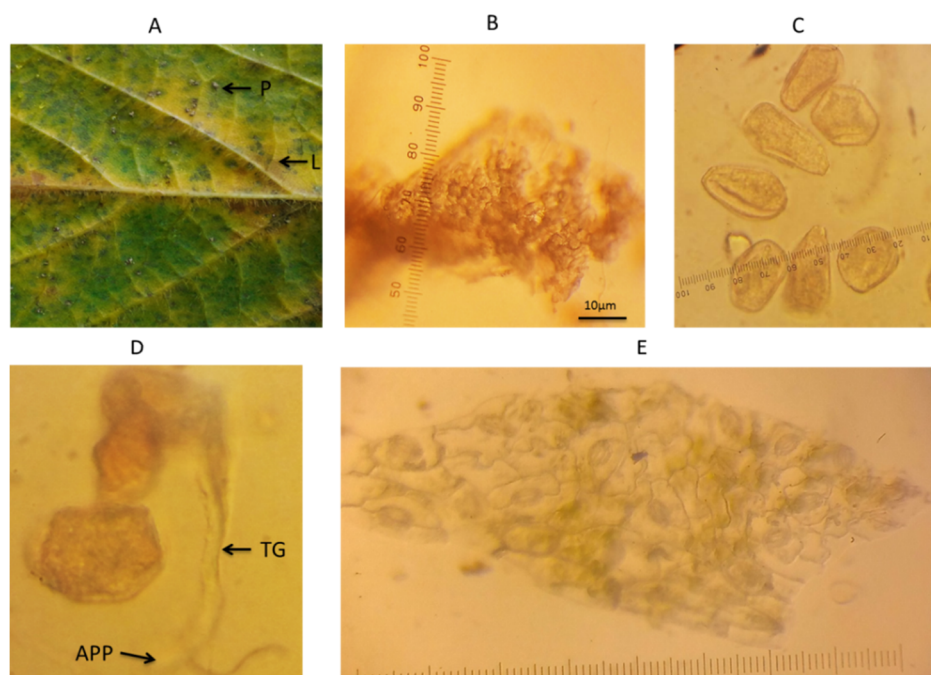


Fig. 28. Caractéristiques macroscopique et microscopique d'une culture pure d'isolats de *P. pachyrhizi* vu au grossissement X 100.

(A) urédinia, (B) libération des urédospores, (C) urédospores, (D) germination des urédospores (TG. tube germinal, APP. appressarium), (E) structure de teliospore.

III.1.2.2. Morphologies des urédospores issues des différents isolats de *Phakopsora pachyrhizi*

Les formes des urédospores ont été très diversifiées. Au total 07 formes ont été identifiées. Il s'agit des formes pépiniformes (Fig. 29A); elliptiques (Fig. 29B); Sub-sphériques (Fig. 29C), amygdaliformes (Fig. 29D); globose (Fig. 29E); anguleuse (Fig. 29F) et Sub-anguleuse (Fig. 29G). Ces formes obtenues faisaient état d'une grande variabilité des urédospores au Cameroun avec la présence de deux nouvelles formes : pépiniformes et anguleuses (Fig. 29).

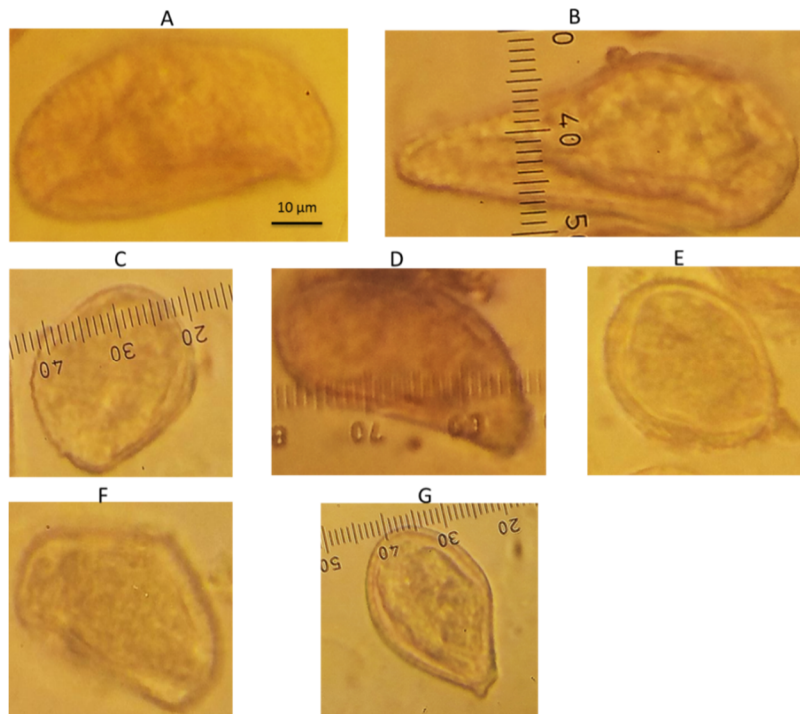


Fig. 29. Formes des urédospores de *Phakopsora pachyrhizi* dans les cinq zones agro-écologiques du Cameroun observées au grossissement X 100.

III.1.2.3. Morphométries des urédospores de *Phakopsora pachyrhizi*

Les paramètres longueurs, largeurs et le rapport L/l des urédospores de *P. pachyrhizi* ne présentaient pas de différences significatives entre les isolats des localités de la ZAE I d'une part et entre ceux de la ZAE IV d'autre part. Ces longueurs des urédospores variaient de 23,92 à 28,08 μm ; 24,96 à 27,04 μm et les largeurs de 15,6 à 18,72 μm ; de 15,6 à 17,68 μm respectivement. Leurs rapports L/l se situaient entre [1,42-1,72] et [1,57-1,6] respectivement. Cependant des différences significatives entre les isolats des localités des ZAE II, III et V ont été observées du point de vue longueurs et largeurs. Les longueurs par ZAE variaient de 26 à 35,6 μm ; 26 à 29,12 μm ; 26 à 36,40 μm et les largeurs de 17,68 à 22,88 μm ; 15,60 à 19,76 μm ; 15,60 à 21,84 μm respectivement. Les rapports L/l n'ont présenté aucune différence significative entre les isolats des localités de la ZAE II et ceux de la ZAE III ; Mais variaient significativement entre les isolats des localités de la ZAE V. Ces rapports variaient de 1,33 à 1,55 ; 1,28 à 1,58 et de 1,25 à 2,08 respectivement. L'isolat de la localité de Mbalmayo I a présenté le rapport L/l le plus élevé de 2,08. D'une manière générale, il n'existe pas de différence significative entre les longueurs et le rapport L/l en fonction des ZAE. Cependant, des différences significatives ont été observées entre les largeurs de la ZAE II et les autres ZAE. Ces longueurs variaient de 25,40 à 27,64 ; les largeurs de 16,64 à 19,61 et le rapport L/l de 1,45 à 1,57 (Tableau XV).

Tableau XV. Morphométrie des urédospores des isolats de *P.pachyrhizi* entre les sites par ZAE et entre les ZAE.

ZAE	localités	Longueur urédospores (L) en m	Largeur urédospores (l) en m	Rapport L/l
ZAE I	Tokobere	23,9 2± 5,92a	15,60 ± 3,67a	1,68 ± 0,82a
	soukoudou	28,08 ± 2,84a	17,68 ± 2,84a	1,63 ± 0,37a
	Sanguere1	26 ± 5,2a	18,72 ± 2,84a	1,42 ± 0,37a
	Mokolo	26 ± 4,24a	18,20 ± 3a	1,48 ± 0,19a
	Sanguere2	28,08 ± 2,84a	18,72 ± 2,84a	1,53 ± 0,31a
	Sanguere3	28,08 ± 2,84a	16,64 ± 2,32a	1,72 ± 0,30a
Moyenne		26,69 ± 1,69a	17,30 ± 1,06b	1,57 ± 0,11a
ZAEII	NgaoundéréI	27,04 ± 4,35 b	22,88 ± 2,84a	1,19 ± 0,20a
	NgaoundéréII	28,08 ± 2,84b	18,72 ± 2,84ab	1,53 ± 0,31a
	Mbe	22,88 ± 2,84b	17,68 ± 2,84b	1,33 ± 0,33a
	wack II	27,04 ± 4,35b	18,72 ± 5,92ab	1,55 ± 0,44a
	Ganganssoua1	35,36 ± 2,32a	22,88 ± 2,84a	1,56 ± 0,17a
	Ganganssoua2	26,00 ± 5,2b	17,68 ± 2,84b	1,5 0 ± 37a
	Ganganssoua3	29,12 ± 6,97b	18,72 ± 2,84ab	1,55 ± 0,24a
Moyenne		27,21 ± 2,40a	19,61 ± 2,28a	1,45 ± 0,14a
ZAEIII	Banganté1	27,04 ± 4,35a	17,68 ± 2,84ab	1,57 ± 0,39 a
	Banganté2	21,84 ± 2,32b	15,60 ± 0,00b	1,4 ± 0,14 a
	Banganté3	26,00 ± 0,0a	17,68 ± 2,84ab	1,5 ± 0,22 a
	Santchou	27,04 ± 2,32a	17,68 ± 2,84ab	1,55 ± 0,18a
	Bamenda	26,00 ± 3,67a	16,64 ± 2,32ab	1,58 ± 0,3a
	Diandam	20,80 ± 3,67b	16,64 ± 2,32ab	1,28 ± 0,33a
	Mbouda	29,12 ± 2,84a	19,76 ± 2,32a	1,48 ± 0,14a
Moyenne		25,40 ± 2,99a	17,38 ± 1,30b	1,48 ± 0,1a
ZAE IV	LALA	27,04 ± 2,32a	17,68 ± 2,84a	1,57 ± 0,31a
	Pendja	24,96 ± 4,35a	15,60 ± 0,00a	1,60 ± 0,27a
Moyenne		26 ± 1,47a	16,64 ± 1,47b	1,58 ± 0,02a
ZAEV	Balmayo1	36,40 ± 3,67a	17,68 ± 2,84abc	2,08 ± 0,25a
	Mbalmayo 2	20,80 ± 3,67c	16,64 ± 2,32bc	1,25 ± 0,14c
	Nkolbisson	27,04 ± 2,32b	18,72 ± 2,84abc	1,5 ± 0,20bc
	Batchenga	28,08 ± 2,84b	15,60 ± 0,00c	1,8 ± 0,18ab
	Bafia	26,00 ± 3,67b	18,72 ± 2,84abc	1,42 ± 0,28bc
	Mfou1	35,36 ± 4,35a	19,76 ± 2,32a	1,82 ± 0,35ab
	Mfou2	27,04 ± 2,32b	21,84 ± 2,32abc	1,25 ± 0,17c
	Mfou3	27,04 ± 6,7b	18,72 ± 2,84abc	1,45 ± 0,29bc
	Mfou4	28,08 ± 2,84b	19,76 ± 4,35abc	1,47 ± 0,34bc
	Mfou5	26,00 ± 0,00b	19,76 ± 2,32abc	1,33 ± 0,18c
	Mfou6	23,92 ± 2,84bc	20,80 ± 3,67ab	1,19 ± 0,32c
Fougerole	26,00 ± 3,67b	18,72 ± 2,84abc	1,43 ± 0,39bc	
Moyenne		27,64 ± 4,33a	18,21 ± 1,04ab	1,49 ± 0,26ab

Les nombres moyens suivis des mêmes lettres par colonne dans la ZAE ne sont pas significativement différentes d'après le test de Tukey à la probabilité $P < 0,05$.

Toutefois, la classification des urédospores des 34 isolats à partir d'un dendrogramme en fonction des différentes tailles (rapport L/l) a révélé la présence de 4 grands groupes de tailles des urédospores avec pour moyennes respectives 2,08 ; 1,26 ; 1,51 et 1,76 (Fig. 30).

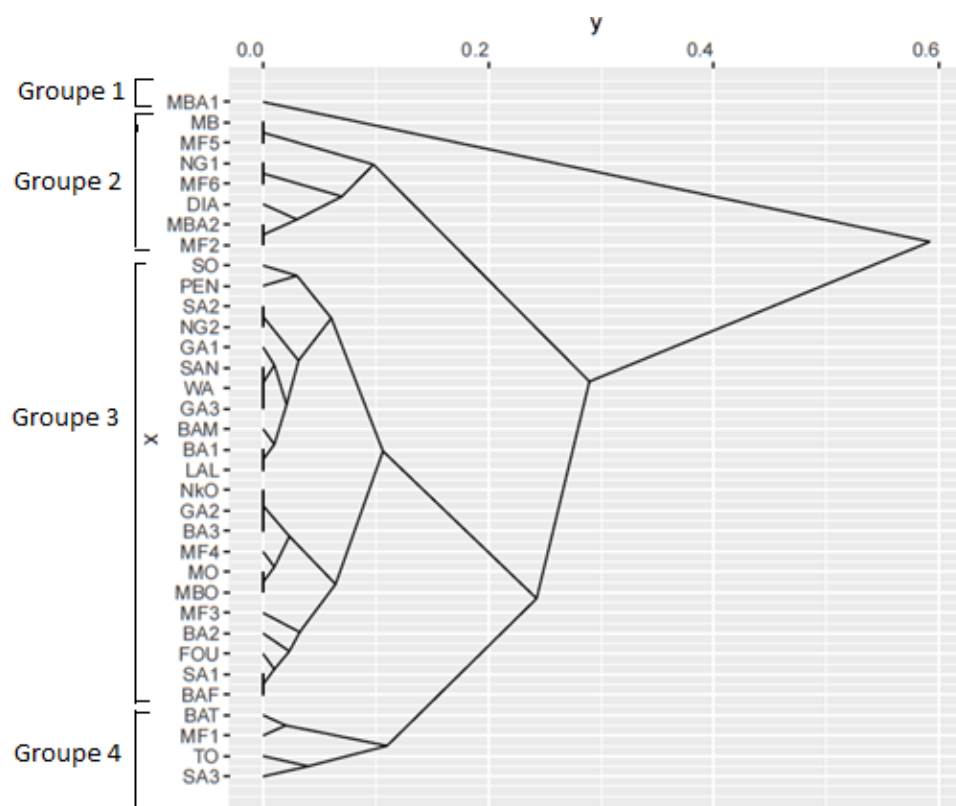


Fig. 30. Cluster de classification des tailles des urédospores en fonction de leur rapport Longueur/largeur

III.1.2.4. Agressivité des isolats de *Phakopsora pachyrhizi* sur les feuilles détachées de soja

Les 34 isolats de *P. pachyrhizi* obtenus ont induit la maladie sur les feuilles détachées de soja en boîte de Pétri. Les uredines et les lésions observées sont ceux typiques de la rouille asiatique. Le degré d'agressivité a varié d'un isolat à un autre au 3, 6, 9 et 14^{ème} jours après inoculation (JAI). Au 14^{ème} JAI, les isolats GA1, WA, MB appartenant à la ZAE II; l'isolat BAM appartenant à la ZAE III et l'isolat MF2 appartenant à la ZAE V ont présenté un plus grand degré d'agressivité par rapport aux autres. Ce degré était de 84; 84,33 et 76,67 % respectivement pour la ZAE II ; de 84 et 79,33 % respectivement pour les ZAE III et V. Les plus faibles agressivités ont été obtenues avec les isolats MO, TO appartenant à la ZAE I et l'isolat BA1 appartenant à la ZAE III; Ceci avec un degré d'agressivité de 46, 52 et 50 % respectivement (Tableau XVI). L'isolat WA le plus agressif en provenance de la ZAE II a été utilisé pour la suite des essais en serre.

Tableau XVI. Agréssivité des différents isolats au cours des différentes prises de données

Isolats	3JAI	6JAI	9JAI	14JAI
TO	8,33 ± 0,57mno	12,67 ± 1,15p	19,67 ± 3,78r	52 ± 6,24fgh
SO	14,67 ± 1,15fgh	19,67 ± 2,08op	28,67 ± 1,52opqr	59,33 ± 4,93ef
SA1	16 ± 1,0def	27,33 ± 2,08ghij	42,67 ± 3,21efg	55,67 ± 3,21fg
SA2	13 ± 1,73hij	26,67 ± 2,51hijk	33,33 ± 5,13klmno	53,33 ± 3,78fgh
SA3	10,67 ± 1,52jklm	24,67 ± 3,21jklm	38,67 ± 1,52ghi	66,33 ± 7,37de
MO	21,67 ± 1,52ab	31,33 ± 2,51cdef	43,67 ± 1,52ef	46,33 ± 6,50h
NG1	11,33 ± 2,08jkl	22,33 ± 2,30mnop	31,33 ± 3,21nopq	70,33 ± 2,08bcd
NG2	21,67 ± 1,15ab	28,33 ± 2,08fghi	40,± 3fgh	72,33 ± 3,78bcd
MB	19 ± 1bc	35,67 ± 2,08abcd	45,33 ± 3,05cde	76,67 ± 3,05abc
WA	12,33 ± 2,08ijk	32,33 ± 2,51bcde	46 ± 2,0bcde	84,33 ± 5,13a
GA1	38,67 ± 1,15a	50,33 ± 2,88a	70 ± 3a	84 ± 5,29a cd
GA2	5 ± 1,7o	28,33 ± 1,52fghi	36,67 ± 3,21hijkl	70 ± 2cd
GA3	11 ± 1jklm	29 ± 1,73efg	35,33 ± 3,05ijklmn	66 ± 7de
BA1	8,33 ± 1,52mno	21 ± 1,73nop	38 ± 2,64hij	50,67 ± 5,13bcd
BA2	17,67 ± 1,52cd	38 ± 1,73abc	44 ± 1,73def	75 ± 2,64gh
BA3	15 ± 1efg	40,67 ± 2,08ab	50 ± 2,64abc	73,67 ± 3,05bcd
SAN	8,67 ± 1,52lmno	25 ± 2jklm	42,67 ± 2,08efg	74,67 ± 2,30bcd
BAM	14,67 ± 1,52fgh	26 ± 1,73jkl	37 ± 4,35hijkl,	84 ± 5,56a
DIA	14,33 ± 0,51ghi	30,33 ± 1,52def	38 ± 1,73hij	73,33 ± 3,05bcd
MBO	16,33 ± 1,52def	28,67 ± 1,52fgh	36,33 ± 2,08ijklm	73,33 ± 2,51bcd
LAL	16,67 ± 1,52cde	24 ± 1,73lmno	33,67 ± 1,52lmno	67,67 ± 2,5cd
PEN	24 ± 1a	29,33 ± 1,52efg	44,67 ± 2,51cde	73,33 ± 4,16bcd
MBA1	17,67 ± 2,08cd	25,67 ± 1,15jkl	35,33 ± 1,52jklmn	72,33 ± 7,50bcd
MBA2	12,67 ± 1,51ijk	31 ± 2,64def	38 ± 2,64hij	70 ± 6,92cd
NkO	6,33 ± 1,52o	24,33 ± 2,08klmn	35,33 ± 1,52	73 ± 3bcd
BAT	17,67 ± 2,51cd	22,33 ± 1ijkl	26 ± 2pqr	70,67 ± 1,52bcd
BAF	17,67 ± 1,52cd	26,33 ± 2,08mnop	55 ± 3ab	73,33 ± 2,88bcd
MF1	22,33 ± 2,08ab	39,33 ± 3,05ab	49,33 ± 3,05abcd	74,33 ± 3,51bcd
MF2	10 ± 1,0klmn	32,33 ± 2,30bcde	47,33 ± 2,51abcde	79,33 ± 2,51ab
MF3	14 ± 1ghi	25,67 ± 1,52jkl	37,33 ± 3,05hijk	71 ± 2bcd
MF4	31,67 ± 1,52a	41,33 ± 3,05ab	50,67 ± 4,16abc	66,33 ± 8,96 de
MF5	14,33 ± 1,52ghi	25 ± 2klm	32,33 ± 2,30mnop	71,33 ± 4,16bcd
MF6	17,33 ± 2,51cd	26,33 ± 1,52ijkl	32,67 ± 2,08mnop	71 ± 3,60bcd
FOU	7,67 ± 1,15no	17,33 ± 2,08p	24 ± 2,64qr	71,67 ± 3,05bcd
Pr(>F)	1,995	1,995	1,995	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; JAI : jour après inoculation. Les nombres moyens suivis des mêmes lettres dans la même colonne ne sont pas significativement différentes d'après le test de Kruskal-wallis et de Tukey à la probabilité P< 0,05.

III.1.3. Criblage de quelques variétés de soja pour leur résistance ou susceptibilité à *Phakopsora pachyrhizi*

III.1.3.1. Paramètres épidémiologiques de la rouille asiatique du soja sur les variétés criblés

III.1.3.1.1. Incidence de la rouille asiatique du soja

L'incidence de la maladie observée sur les 43 variétés au cours des prises de données, a varié en fonction des variétés (Tableau XVI), A 6, 8 et 10 SAS ($P < 0,001$). La variété locale R3 a présenté les incidences les plus élevées de 16,67 ; 29,63 et 75,93 % respectivement. Elle a été suivie de la variété S1150-5-22 qui a présenté des incidences de 12,96 et 25,93 % respectivement à 6 et 8 SAS. Les variétés AFAYAK, JENGUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-2001-1DM, TGX-2001-80M et TGX-2007-11F ont présenté des incidences nulles à la 6 SAS. Par contre, à 10 SAS, elles ont enregistré respectivement des incidences de 16,67 ; 25,93 ; 50 ; 55,56 ; 37,04 ; 48,15 ; 46,30 et 59,26 % (Tableau XVII).

Tableau XVII. Variation de l'incidence de la maladie en fonction des variétés et des semaines

Variétés	6 SAS	8 SAS	10 SAS
AFAYAK	0,00 ± 0,00 h	3,70 ± 1,63 hi	16,67 ± 5,56 q
CLARK-63K	5,56 ± 1,39 ef	16,67 ± 4,18 bc	48,15 ± 5,37 hij
DPSB8	11,11 ± 2,56 bc	12,96 ± 3,12 cde	57,41 ± 3,02 def
JENGUMA	0,00 ± 0,00 h	5,56 ± 1,90 ghi	25,93 ± 8,49 p
MAKSOY2N	0,00 ± 0,00 h	3,70 ± 1,62 hi	50,00 ± 6,96 ghi
MAKSOY3N	0,00 ± 0,00 h	3,70 ± 1,62	55,56 ± 6,94 efg
R2	7,41 ± 2,83 de	16,67 ± 3,68 bc	50,00 ± 6,67 ghi
R3	16,67 ± 3,68 a	29,63 ± 3,39 a	75,93 ± 4,23 a
S1140-5-4	0,00 ± 0,00 h	7,41 ± 2,57 fgh	37,04 ± 6,51 lmn
S1150-5-22	12,96 ± 4,07 b	25,93 ± 5,26 a	61,11 ± 6,05 de
SCS-1	9,26 ± 2,83 cd	18,52 ± 6,40 b	50,00 ± 5,85 ghi
SCSAGA	1,85 ± 0,54 gh	14,81 ± 4,21 bcd	59,26 ± 6,50 def
SNKGM011	9,26 ± 1,78 cd	16,67 ± 4,06 bc	44,44 ± 5,46 ijk
SOUNG PUNGUN	3,70 ± 1,78 fg	9,26 ± 2,83 efg	53,70 ± 6,42 fgh
TGX-1448-2E	1,85 ± 0,31 gh	3,70 ± 1,35 hi	74,07 ± 4,21 ab
TGX-1485-1D	3,70 ± 1,78 fg	11,11 ± 2,56 def	50,00 ± 9,62 ghi
TGX-1835-10E(L)	5,56 ± 1,56 ef	9,26 ± 3,43 efg	33,33 ± 5,56 mno
TGX-1987-62F	3,70 ± 1,06 fg	3,70 ± 1,58 hi	42,59 ± 6,63 jkl
TGX-1991-22F	7,41 ± 2,14 de	11,11 ± 4,82 def	68,52 ± 3,21 bc
TGX-2001-10DM	1,85 ± 0,31 gh	11,11 ± 2,56 def	61,11 ± 6,12 de
TGX-2001-13DM	1,85 ± 0,61 gh	3,70 ± 1,22 hi	37,04 ± 3,90 lmn
TGX-2001-14DM	1,85 ± 1,07 gh	7,41 ± 2,57 fgh	18,52 ± 6,92 q
TGX-2001-1DM	0,00 ± 0,00 h	3,70 ± 2,05 hi	48,15 ± 5,99 hij
TGX-2001-24DM	1,85 ± 1,07 gh	9,26 ± 4,10 efg	48,15 ± 5,99 hij
TGX-2001-80M	0,00 ± 0,00 h	7,41 ± 2,63 fgh	46,30 ± 5,32 ij
TGX-2002-14DM	3,52 ± 1,17 fg	14,77 ± 3,87 bcde	18,79 ± 6,48 q
TGX-2002-1DM	1,85 ± 0,61 gh	11,11 ± 0,77 def	68,52 ± 6,72 bc
TGX-2002-23DM	9,26 ± 3,39 cd	18,52 ± 2,09 b	42,59 ± 5,93 jkl
TGX-2004-10F	3,70 ± 1,24 fg	14,81 ± 4,87 bcd	31,48 ± 7,13 nop

TGX-2004-13F	12,96 ± 4,21 b	18,52 ± 6,51 b	59,26 ± 6,12 def
TGX-2004-3F	1,85 ± 0,79 gh	5,56 ± 1,56 ghi	29,63 ± 6,42 op
TGX-2006-3F	3,70 ± 1,32 fg	14,81 ± 4,21 bcd	62,96 ± 7,08 cd
TGX-2007-11F	0,00 ± 0,00 h	1,85 ± 0,31 i	59,26 ± 4,46 ghi
TGX-2007-8F	7,41 ± 2,91 de	16,67 ± 2,87 bc	50,00 ± 3,51 ghi
TGX-2008-2F	5,56 ± 1,90 ef	9,26 ± 2,83 efg	62,96 ± 5,04 cd
TGX-2008-4F	1,85 ± 1,07 gh	3,70 ± 1,13 hi	55,56 ± 8,07 efg
TGX-2010-11F	5,56 ± 1,56 ef	7,41 ± 2,57 fgh	33,33 ± 5,29 mno
TGX-2010-12F	3,70 ± 1,62 fg	9,26 ± 1,22 efg	44,44 ± 9,88 ijk
TGX-2010-15F	9,26 ± 1,48 cd	25,93 ± 4,10 a	38,89 ± 5,64 klm
TGX-2010-3F	1,85 ± 0,66 gh	7,41 ± 2,83 fgh	47,78 ± 8,89 hij
TGX-2011-3F	5,56 ± 0,87 ef	7,41 ± 2,39 fgh	62,96 ± 6,42 cd
TGX-2011-7F	7,41 ± 3,26 de	18,52 ± 7,28 b	55,93 ± 9,33 efg
TGX-2014-19FM	3,70 ± 2,14 fg	9,26 ± 3,39 efg	53,70 ± 4,49 fgh
LSD	3,01	5,52	6,36
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05; SAS: semaine après semis, Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de LSD à P< 0,05,

III.1.3.1.2. Sévérité de la rouille asiatique du soja en fonction des variétés

La sévérité de la maladie observée durant les différentes prises de données variait en fonction des variétés (Tableau XVIII). Des différences significatives ($P < 0,001$) ont été enregistrées entre les sévérités des différentes variétés au cours du temps. La variété locale R3 a présenté les sévérités les plus élevées de 21,17 et 24,14 % respectivement à 6 et 8 SAS. Par contre, à 6 SAS, les variétés AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-1448-2E, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM, TGX-2001-80M et TGX-2007-11F ont eu une sévérité nulle. A la 10ème SAS la variété TGX-2002-14DM a présenté la sévérité la plus élevée (9,26 %) comparée à la variété TGX-2001-1DM qui a enregistré la sévérité la plus faible (10 %) (Tableau XVIII).

Tableau XVIII. Variation de la sévérité de la maladie en fonction des variétés et du temps

Variétés	6SAS	8SAS	10SAS
AFAYAK	0,00 ± 0,00 n	5,20 ± 2,30 rstu	18,05 ± 4,10 lmnop
CLARK-63K	3,22 ± 1,34 klm	17,01 ± 4,82 cdefg	28,33 ± 7,63 de
DPSB8	12,81 ± 3,04 b	19,67 ± 2,51 bc	26,17 ± 3,75 defgh
JENGUMA	0,00 ± 0,00 n	3,33 ± 1,44 tu	33,89 ± 4,19 bc
MAKSOY2N	0,00 ± 0,00 n	6,67 ± 1,44qrst	18,00 ± 3,60 defgh
MAKSOY3N	0,00 ± 0,00 n	7,55 ± 0,88 pqrs	25,93 ± 5,26 defgh
R2	7,78 ± 3,02 efgh	14,80 ± 3,30 fghij	27,61 ± 4,87 def
R3	21,17 ± 5,39 a	24,14 ± 5,77 a	34,72 ± 7,46 bc
S1140-5-4	0,00 ± 0,00 n	14,79 ± 2,86 fghij	24,75 ± 3,47 efghi
S1150-5-22	6,39 ± 2,26 fghi	11,44 ± 3,09 jklmn	17,83 ± 4,07 fghi
SCS-1	6,11 ± 1,92 ghij	11,67 ± 2,30 jklm	15,17 ± 0,28 nop
SCSAGA	1,79 ± 0,97 mn	7,18 ± 0,74 pqrs	23,87 ± 4,19 efghij
SNKGM011	10,83 ± 4,07 bcd	13,01 ± 0,44 hijkl	24,44 ± 3,93 efghij
SOUNG PUNGUN	6,67 ± 2,08 fgh	14,81 ± 1,94 fghij	22,74 ± 3,85 fghijk
TGX-2010-11F	6,69 ± 2,70 fgh	8,67 ± 1,52 mnopqr	23,33 ± 3,51 fghijk
TGX-2010-12F	6,67 ± 3,05 fgh	9,38 ± 1,19 mnopq	18,68 ± 1,15 klmno
TGX-1448-2E	0,00 ± 0,00 n	8,81 ± 1,84 mnopq	15,59 ± 3,64 nop
TGX-1485-1D	7,77 ± 1,76 efgh	15,69 ± 1,53 efghi	28,25 ± 4,54 de
TGX-1835-10E(L)	5,85 ± 2,38 ghijk	11,25 ± 3,30 jklmno	17,92 ± 3,60 fghi
TGX-1987-62F	3,33 ± 1,53 jklm	14,39 ± 2,47 ghij	27,18 ± 4,04 def
TGX-1991-22F	2,44 ± 1,2 lmn	7,92 ± 1,70 nopqr	15,86 ± 2,51 nop
TGX-2001-10DM	3,61 ± 1,92 ijklm	7,00 ± 1,73 qrs	15,09 ± 1,51 op
TGX-2001-13DM	5,89 ± 2,45 hijk	17,96 ± 1,80 cdef	24,78 ± 4,29 efghi
TGX-2001-14DM	1,67 ± 0,76 mn	15,81 ± 3,67 defgh	23,27 ± 5,12 fghijk
TGX-2001-1DM	0,00 ± 0,00 n	2,83 ± 1,44 u	10,00 ± 2,0 q
TGX-2001-24DM	0,00 ± 0,00 n	11,36 ± 1,85 jklmn	16,11 ± 3,47 nop
TGX-2001-80M	0,00 ± 0,00 n	7,78 ± 0,69 opqr	13,44 ± 3,44 pq
TGX-2002-14DM	3,70 ± 1,78 ijklm	16,67 ± 1,55 cdefg	59,26 ± 4,20 a
TGX-2002-1DM	7,40 ± 2,71 fgh	11,28 ± 1,11 jklmno	19,88 ± 3,47 jklmn
TGX-2002-23DM	9,17 ± 3,25 cdef	13,61 ± 2,36 ghijk	26,28 ± 3,27 defg
TGX-2004-10F	5,00 ± 1,00 hijkl	10,65 ± 0,62 klmnop	21,03 ± 5,84 ijklm
TGX-2004-13F	8,50 ± 3,04 defg	18,47 ± 3,51 bcde	30,00 ± 6,61 cd
TGX-2004-3F	5,00 ± 1,73 hijkl	13,89 ± 1,92 ijklm	19,81 ± 1,25 jklmno
TGX-2006-3F	2,67 ± 1,52 lmn	9,44 ± 1,26 lmnopq	17,53 ± 2,28 mnop
TGX-2007-11F	0,00 ± 0,00 n	4,17 ± 2,02 stu	15,26 ± 0,70 nop
TGX-2007-8F	5,55 ± 1,89 hijk	15,00 ± 2,60 fghij	25,33 ± 4,50 defghi
TGX-2008-2F	5,56 ± 1,89 hijk	14,07 ± 3,56 ghijk	21,53 ± 4,41 hijklm
TGX-2008-4F	3,33 ± 1,53 jklm	12,21 ± 3,00 ijklm	23,15 ± 1,95 fghijk
TGX-2010-15F	11,51 ± 5,93 bc	21,67 ± 2,88 ab	35,05 ± 5,12 b
TGX-2010-3F	1,67 ± 0,76 mn	14,44 ± 3,93 fghij	22,41 ± 1,01 ghijkl
TGX-2011-3F	10,44 ± 4,11 bcde	13,17 ± 2,84 ghijk	25,56 ± 4,10 defghi
TGX-2011-7F	1,33 ± 0,58 mn	19,36 ± 0,82 bcd	38,33 ± 2,88 b
TGX-2014-19FM	6,19 ± 2,97 ghij	15,25 ± 4,75 efghi	17,93 ± 2,55 fghi
LDS	2,88	3,56	4,76
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis, Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de LSD à P < 0,05

III.1.3.2. Rendement des variétés de soja criblées

Les rendements des variétés de soja en condition naturelle d'infection variaient en fonction des variétés. L'analyse des variances a révélé une différence significative entre les variétés ($P < 0,05$) concernant les rendements en grains. Les variétés TGX-2010-12F (1,17 t/ha), TGX-2010-3F (0,78 t/ha) ont présenté les rendements les plus élevés contrairement aux variétés R3 (0,17 t/ha) et R2 (0,19 t/ha) dont les rendements ont été les plus faibles. Cependant les variétés TGX-2010-3F (0,78 t/ha) et CLARK-63K (0,779 t/ha) n'ont pas été statistiquement différentes (Fig. 31).

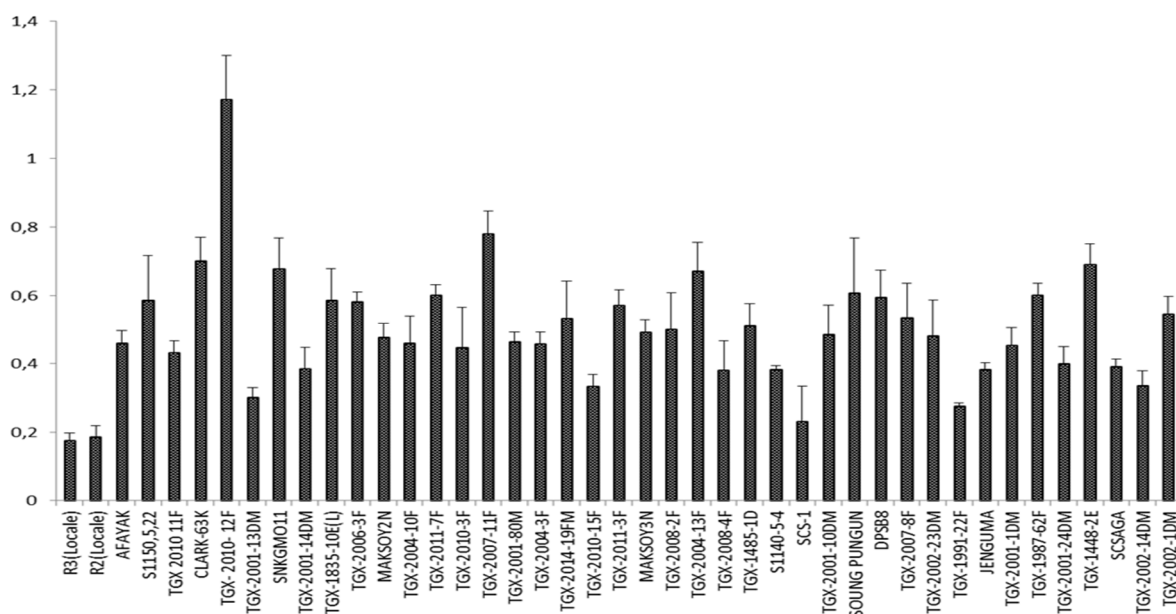


Fig. 31. Rendement en t/ha des 43 variétés de soja en condition naturelle d'infection

III.1.3.3. Dendrogramme des variétés en fonction des paramètres épidémiologique et du rendement

En tenant compte des différents paramètres de l'étude, à savoir l'incidence, la sévérité et le rendement, un dendrogramme a été réalisé (Fig. 32). Trois groupes se dégagent de cette classification. Le premier est constitué de 12 variétés qui ont été très sensibles à la rouille asiatique et qui ont présenté des rendements faibles (R3, SCS-1, TGX-2002-23DM, R2, TGX-2014-19FM, TGX-2011-7F...), Le deuxième groupe est composé de 12 variétés qui ont été sensibles à la rouille asiatique et ont présenté un rendement élevé, Parmi celles-ci, on a trouvé les variétés TGX-2010-12F, TGX-2010-3F CLARK-63K et TGX-2002-23DM, TGX-2007-11F, TGX-2008-4F, SOUNG POUNGUN. Le troisième groupe est composé des 19 variétés parmi lesquelles SCSAGA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, TGX-2002-80M, AFAYAK, qui ont présenté une faible sévérité de la maladie mais avec un faible rendement.

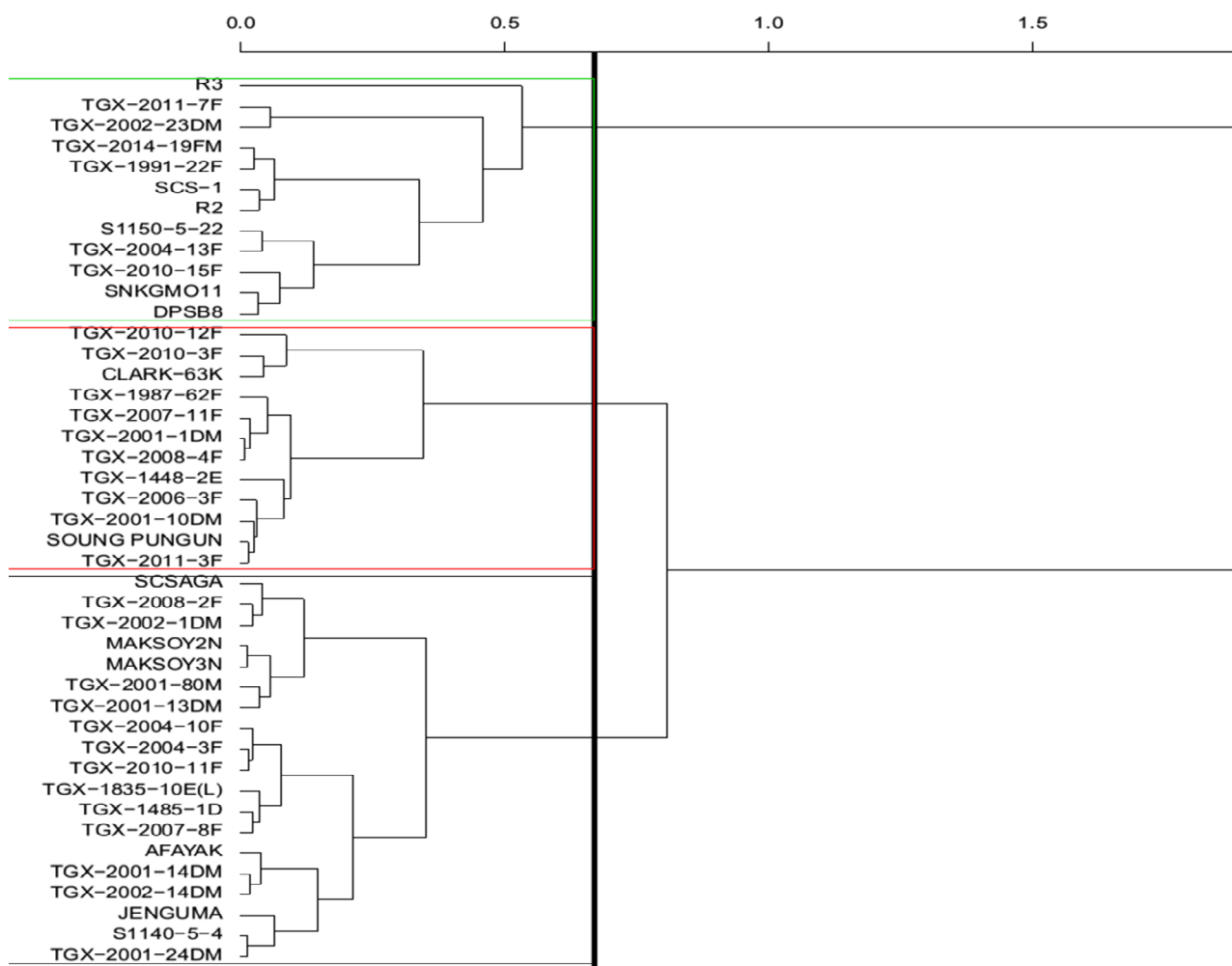


Fig. 32. Dendrogramme de criblage des 43 variétés de soja en fonction des moyennes des incidences, sévérités et rendement dans les conditions d'infection naturelles.

III.1.3.4. Choix variétale

A l'issue du criblage variétale la variété TGX-1835-10 E apparemment résistante et R3 qui est une variété très sensible ont été retenues pour des essais en serre et en champ. Ces deux variétés ont été obtenues respectivement de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) de Foubot et Garoua ayant pour origine l'IITA. Elles sont caractérisées par un cycle de semis-maturité de 90-100 jours et 110-120 jours, un port végétatif respectivement nain et érigé, un rendement potentiel de 1,5 à 2 t/ha et 2 à 3 t/ha. Toutes deux sont des variétés améliorées contre la szeptoriose et la déhiscence respectivement.

III.1.4. Effet des souches de CMA sur le développement de *Phakopsora pachyrhizi* en serre et en champ

III.1.4.1. Effet des souches de CMA sur le développement de *Phakopsora pachyrhizi* en serre

III.1.4.1.1. Effet des traitements et variétés sur les paramètres de croissances en serre

III.1.4.1.1.1. Hauteur de la tige

La Hauteur de la tige observée pendant les différentes prises de donnée augmentait en fonction des variétés et traitements à 6, 8 et 10 SAS (Tableau XIX). A 6 SAS, un effet significatif ($P < 0,05$) pour l'interaction variété x traitement a été observé. La hauteur de la tige la plus élevée a été obtenue chez la variété TGX-1835-10 E (V1) traitée avec le composite mycorhizien T9 ($69,33 \pm 7,32$ cm) et la hauteur la plus faible chez la même variété traitée au fongicide T0⁺ (26 ± 4 cm). Un effet significatif ($P < 0,001$) a été observé entre les traitements à cette période. Les traitements mycorhiziens T7, T8, T9 et T6 ont enregistré statistiquement les hauteurs les plus élevées ($61,50 \pm 8,99$; $58,91 \pm 9,66$; $55,50 \pm 17,04$; $55,08 \pm 10,87$ cm) ; contrairement au fongicide et témoin négatif qui ont enregistré les hauteurs les plus faibles ($29,08 \pm 7,24$ et $32,71 \pm 8,89$ cm). Il n'existe pas d'effet significatif entre les variétés à cette période. A 10 SAS, aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement. Néanmoins la variété TGX-1835-10 E a enregistré les hauteurs les plus élevées ($125,67 \pm 14,63$; $122,33 \pm 19,21$ et $121,50 \pm 21,01$ cm) avec les traitements mycorhiziens monospores T3 et composite T5 et T7 ; contrairement au témoin absolu de la même variété ($43,83 \pm 11,67$ cm). Un effet très hautement significatif a été observé entre les traitements et entre les variétés ($P < 0,001$). Les traitements mycorhiziens T6, T3, T7 et T5 ont enregistré les hauteurs les plus élevées ($106,33 \pm 19,38$; $103,91 \pm 26,92$; $103,41 \pm 26,66$; $103,08 \pm 27,34$ cm) ; contrairement au témoin négatif qui a enregistré la hauteur la plus faible ($48,50 \pm 13,44$ cm). En générale les pots traités aux traitements mycorhizés ont enregistré des hauteurs plus élevées par rapport aux témoins à ces différentes périodes (Fig.33). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a eu la hauteur la plus élevée ($97,73 \pm 27,23$ cm) par rapport à la variété R3 ($77,31 \pm 18,26$ cm).

Tableau XIX. Variation de la hauteur de la tige en fonction des variétés et des traitements

Variétés	Traitements	6 SAS	8 SAS	10 SAS
Variété TGX-1835-10 E (V1)	T0+	26 ± 4d	31,33 ± 8,89e	47,33 ± 22,30cd
	T0-	28,58 ± 3,02cd	31,67 ± 10,12e	43,83 ± 11,67d
	T1	44,5 ± 7,46abcd	65,67 ± 12,09abcde	101,83 ± 17,55abcd
	T2	61 ± 7,54ab	80,33 ± 10,77abc	112,33 ± 16,92abc
	T3	60,5 ± 7,76abc	95,33 ± 13a	125,67 ± 14,63a
	T4	45,17 ± 7,94abcd	61,17 ± 9,93abcde	95 ± 23,64abcd
	T5	54,67 ± 9abcd	74,83 ± 9,25abcd	122,33 ± 19,21a
	T6	59,17 ± 8,28abc	81,67 ± 10,77abc	116,17 ± 17,78ab
	T7	60,83 ± 8,50abc	77,67 ± 14,14abc	121,50 ± 21,01a
	T8	55,67 ± 10,61abcd	75,33 ± 14,75abcd	99,833 ± 22,50abcd
	T9	69,33 ± 7,32a	83,83 ± 9,25ab	117 ± 16,02ab
	T10	51,17 ± 9,8abcd	72,17 ± 13,38abcd	113 ± 15,62ab
	T11	50,50 ± 10,64abcd	77,67 ± 13,65abc	102,5 ± 16,02abcd
	T12	34,33 ± 8bcd	44,67 ± 14,22cde	73,83 ± 21,38abcd
	T13	49,67 ± 12abcd	69,67 ± 10,11abcde	85,67 ± 23,27abcd
T14	44,5 ± 10,82abcd	64,33 ± 15,63abcde	86 ± 21,70abcd	
	Moyenne V1	49,72 ± 13,87a	67,95 ± 20,32a	97,73958 ± 27,23a
Variété R3 (V2)	T0+	32,17 ± 9,30bcd	37,67 ± 7,78de	54,33 ± 17,86bcd
	T0-	36,83 ± 11,72bcd	44,17 ± 8,14cde	53,17 ± 15,82bcd
	T1	53,50 ± 13abcd	71,50 ± 10,53abcd	83,50 ± 20,38abcd
	T2	45,33 ± 13abcd	56,33 ± 12,09bcde	70,17 ± 20,039abcd
	T3	49,17 ± 8,75abcd	71,67 ± 8,60abcd	82,17 ± 17,86abcd
	T4	53,33 ± 12abcd	60,50 ± 13,14abcde	91 ± 25,43abcd
	T5	47,5 ± 11,30abcd	65 ± 11,45abcde	83,83 ± 19,69abcd
	T6	51,0 ± 13,31abcd	60 ± 14,75abcde	96,50 ± 24,96abcd
	T7	62,17 ± 11,34ab	74,33 ± 9,71abcd	85,33 ± 19,29abcd
	T8	62,17 ± 9,43ab	71 ± 11,53abcd	84,67 ± 24,97abcd
	T9	41,67 ± 9,92abcd	50,33 ± 13,15bcde	62,50 ± 17,32abcd
	T10	54,33 ± 12,09abcd	72,67 ± 11,67abcd	80,33 ± 16,80abcd
	T11	42,33 ± 10,75abcd	47,5 ± 15,74bcde	74,67 ± 21,38abcd
	T12	55,67 ± 6,89abcd	66,67 ± 10,10abcde	85,67 ± 27,13abcd
	T13	49,83 ± 11,85abcd	66,17 ± 16,98abcde	79 ± 27,07abcd
T14	50,83 ± 11,59abcd	54,83 ± 11,18bcde	70,17 ± 20,77abcd	
	Moyenne V2	49 ± 12,26a	60,64 ± 14,76b	77,31 ± 18,26b
	Pr(>F)V	0,8133ns	0,004027**	<0,001***
	Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	0,0197*	0,004387**	0,1352ns

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05, ns : non significatif, SAS: semaine après semis, Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de Tukey à la probabilité P < 0,05



Fig. 33. Effet des CMA sur la hauteur de la tige (NM : non mycorrhizé ; M : mycorrhizé)

III.1.4.1.1.2. Diamètre au collet de la tige

Une augmentation du diamètre au collet des plantes de soja en fonction des traitements et des variétés au cours du temps a été notée (Tableau XX). A 6, 8 et 10 SAS les pots traités aux CMA ont enregistré des diamètres élevés par rapport aux témoins. A 6 SAS un effet significatif entre les traitements ($P < 0,001$) et entre les variétés ($< 0,01$) a été observé. Les traitements mycorrhiziens (T3, T8, T6 et T10) ont enregistré les diamètres les plus élevés ($3,70 \pm 0,45$; $3,61 \pm 0,66$; $3,32 \pm 0,61$; $3,30 \pm 0,66$ mm) contrairement au témoin négatif et au traitement fongicide qui ont enregistré les diamètres les plus faibles ($1,85 \pm 0,19$; $1,88 \pm 0,48$ mm). Concernant l'effet variété, la variété R3 a enregistré le diamètre le plus élevé ($3,14 \pm 0,70$ mm) par rapport à la variété TGX-1835-10 E ($2,77 \pm 0,68$ mm). Il n'existe pas d'effet significatif entre l'interaction variété x traitement à cette période. A 10 SAS aucun effet significatif n'est observé entre les variétés et entre l'interaction variété x traitement. Seul l'effet traitement est très hautement significatif ($P < 0,001$). Les pots traités au CMA ont données les plus gros diamètres. Bien que ne présentant pas de différence significative entre les traitements mycorrhiziens, les traitements composites (T8, T6, T10) et traitement monospore (T3) ont enregistrés les diamètres les plus élevés ($5,08 \pm 0,54$; $4,98 \pm 0,60$; $4,97 \pm 0,73$; $4,76 \pm 0,40$ mm) par rapport aux traitements au fongicide et témoin négatif ($2,42 \pm 0,28$; $2,45 \pm 0,34$ mm respectivement).

Tableau XX. Variation du diamètre au collet en fonction des variétés et des traitements

Variétés	Traitements	6SAS	8SAS	10SAS
TGX-1835-10 E(V1)	T0+	1,83 ± 0,76bc	2,00 ± 0,00d	2,25 ± 0,25d
	T0-	1,80 ± 0,26c	2,07 ± 0,208cd	2,35 ± 0,30cd
	T1	2,57 ± 0,35abc	3,33 ± 0,76abcd	3,77 ± 0,68abcd
	T2	3,18 ± 0,50abc	3,68 ± 0,76abcd	4,45 ± 0,92abcd
	T3	3,45 ± 0,54abc	3,73 ± 0,55abcd	4,83 ± 0,28ab
	T4	2,33 ± 0,58abc	2,83 ± 1,18abcd	3,75 ± 1,95abcd
	T5	2,88 ± 0,246abc	3,10 ± 0,13abcd	4,25 ± 0,66abcd
	T6	3,00 ± 0,75abc	3,72 ± 0,44abcd	4,82 ± 0,54ab
	T7	2,82 ± 0,57abc	3,82 ± 0,98abcd	4,23 ± 0,77abcd
	T8	3,35 ± 0,56abc	4,17 ± 0,29abc	4,8 ± 0,62ab
	T9	2,93 ± 0,25abc	3,47 ± 0,20abcd	4,42 ± 0,629abcd
	T10	3,03 ± 0,92abc	3,92 ± 0,14abcd	4,78 ± 0,84ab
	T11	2,37 ± 0,55abc	2,85 ± 0,31abcd	3,33 ± 0,28abcd
	T12	3,05 ± 0,66abc	4 ± 1,3abcd	4,50 ± 1,39abcd
	T13	2,93 ± 1,08 abc	3,92 ± 2abcd,	4,50 ± 1,50abcd
T14	2,80 ± 0,23abc	3,32 ± 0,59abcd	3,92 ± 0,14abcd	
	Moyenne V1	2,77 ± 0,68b	3,37 ± 0,92b	4,06 ± 1,07a
R3(V2)	T0+	1,93 ± 0,07bc	2,32 ± 0,23bcd	2,58 ± 0,25bcd
	T0-	1,90 ± 0,13bc	2,20 ± 0,26cd	2,57 ± 0,4bcd
	T1	3,17 ± 0,21abc	3,85 ± 0,21abcd	4,67 ± 0,76abc
	T2	3,12 ± 0,62abc	3,65 ± 0,56abcd	4,37 ± 0,33abcd
	T3	3,95 ± 0,18a	4,38 ± 0,33ab	4,68 ± 0,54abc
	T4	3,17 ± 0,63abc	3,67 ± 0,28abcd	4 ± 0,25abcd
	T5	3,40 ± 0,40abc	4,45 ± 0,43ab	4,97 ± 0,95ab
	T6	3,63 ± 0,31ab	4,40 ± 0,22ab	5,15 ± 0,74a
	T7	2,88 ± 0,73abc	3,60 ± 0,49abcd	4,03 ± 0,30abcd
	T8	3,87 ± 0,75a	4,5 ± 0,41a	5,37 ± 0,32a
	T9	2,83 ± 0,72abc	3,67 ± 0,57abcd	3,67 ± 0,57abcd
	T10	3,57 ± 0,11abc	4 ± 0,82abcd	5,15 ± 0,74a
	T11	3,15 ± 0,65abc	3,55 ± 0,42abcd	4,18 ± 0,27abcd
	T12	3,42 ± 0,77abc	4,03 ± 0,87	4,52 ± 1abcd
	T13	3,25 ± 0,34abc	3,6 ± 0,49abcd	4,37 ± 0,33abcd
T14	3,03 ± 0,45abc	3,90 ± 0,13abcd	4,45 ± 0,50abcd	
	Moyenne V2	3,14 ± 0,70a	3,73 ± 0,75a	4,29 ± 0,92a
	Pr(>F)V	0,001813**	0,008692**	0,1264ns
	Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	0,972322ns	0,832950ns	0,9207ns

P: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05, ns : non significatif, SAS: semaine après semis, Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de Tukey à la probabilité P< 0,05

III.1.4.1.1.3. Nombre de feuilles

Le nombre de feuilles enregistré durant les différentes prises de données augmentait en fonction des variétés et traitements au cours du temps (Tableau XXI). Les pots traités aux CMA ont enregistré un nombre de feuilles élevé par rapport aux témoins. A 6 SAS un effet significatif entre les traitements ($P < 0,001$) et entre les variétés ($P < 0,001$) a été observé. Cependant il n'existe pas d'effet significatif entre l'interaction variété x traitement à cette période. Les traitements mycorhiziens composites (T6, T10) et monospore (T3) ont enregistré les valeurs les plus élevées ($10,58 \pm 2,51$; $9,42 \pm 2,81$ et $9,08 \pm 1,53$) par rapport au traitement au fongicide et témoin négatif ($3,17 \pm 0,81$; $3,33 \pm 1,08$). La variété R3 a enregistré le nombre de feuilles le plus élevé ($8,56 \pm 2,87$) par rapport à la variété TGX-1835-10 E ($6,64 \pm 2,05$). A 10 SAS, les traitements mycorhiziens monospore (T3) et composites (T8, T10, T13) ont enregistré les valeurs les plus élevées ($20,12 \pm 2,20$; $21,12 \pm 4,08$; $19 \pm 4,39$ et $18,67 \pm 3,71$ respectivement) contrairement au témoin négatif ($4,50 \pm 1,30$) qui a enregistré le nombre le plus faible. A cette période, la variété R3 a enregistré la valeur la plus élevée ($17,30 \pm 5,57$) par rapport à la variété TGX-1835-10 E ($14,02 \pm 4,79$).

Tableau XXI. Variation du nombre de feuilles en fonction des traitements et variétés

Variétés	Traitements	6SAS	8SAS	10SAS
TGX-1835-10 E(V1)	T0-	3,17 ± 1,04d	3,50 ± 1,80de	4,17 ± 1,25f
	T0+	3,17 ± 0,76d	3,17 ± 1,25e	4,17 ± 1,25f
	T1	6 ± 2bcd	8 ± 2,64abcde	14,50 ± 2,17abcdef
	T2	7,17 ± 1,04abcd	10,5 ± 2,50abcde	17,67 ± 4,25abcd
	T3	9 ± 1,80abc	13,50 ± 3,27ab	19,67 ± 4,50abc
	T4	5,83 ± 1,25bcd	7,50 ± 2,78abcde	11 ± 3,46bcdef
	T5	7,17 ± 1,75abcd	9,67 ± 2,08abcde	15,83 ± 3,81abcdef
	T6	8,67 ± 1,60abcd	10,83 ± 2,56abcde	16,67 ± 4,53abcde
	T7	6,5 ± 1,5bcd	10 ± 2abcde	13,67 ± 3,25abcdef
	T8	7,33 ± 1,44abcd	11,67 ± 3,54abcde	17,83 ± 4,8abcd
	T9	8 ± 1,5abcd	11 ± 2,64abcde	16,67 ± 4,50abcde
	T10	7,67 ± 1,25abcd	10,17 ± 2,75abcde	15,50 ± 3,04abcdef
	T11	6 ± 0,86bcd	7,83 ± 1,75abcde	10,17 ± 2,75cdef
	T12	7,83 ± 2,02abcd	12,50 ± 3,12abcde	17 ± 5abcd
	T13	7,17 ± 1,75abcd	12,33 ± 3,61abcde	16,167 ± 3,01abcde
T14	5,67 ± 1,75bcd	7,33 ± 1,52abcde	13,67 ± 3,25abcdef	
	Moyenne V1	6,64 ± 2,05b	9,34375 ± 3,37b	14,02 ± 4,79b
R3(V2)	T0-	3,5 ± 1,32cd	4,50 ± 1,8bcde	4,83 ± 2,02ef
	T0+	3,17 ± 1,04d	4 ± 1,8cde	6 ± 2,29def
	T1	9 ± 2abc	11,83 ± 3,17abcde	16,83 ± 3,21abcd
	T2	8,83 ± 2,02abc	12,83 ± 3abcd	16,5 ± 3abcde
	T3	9,17 ± 1,6ab	14 ± 4,76a	20,67 ± 5,25abc
	T4	9,17 ± 2,56ab	13,83 ± 3,05ab	18 ± 4,27abc
	T5	10 ± 2,17ab	13,67 ± 3,88ab	18,83 ± 3,21abc
	T6	12,5 ± 1,50a	14,50 ± 2,64a	20,17 ± 4,75abc
	T7	9 ± 1,80abc	12,50 ± 2,78abcde	18,33 ± 3,17abc
	T8	10 ± 1,5ab	14,83 ± 3,01a	24,50 ± 3,12a
	T9	6,17 ± 1,75bcd	8,67 ± 2,08abcde	13,17 ± 3,05abcdef
	T10	11,17 ± 3,01ab	15,83 ± 4,16a	22,50 ± 3,9ab
	T11	7,83 ± 1,25abcd	12,67 ± 3,32abcd	18 ± 4,27abc
	T12	8,67 ± 2,25abcd	12,83 ± 2,51abcd	19,67 ± 3,78abc
	T13	10,17 ± 1,52ab	14,17 ± 4,36a	21,17 ± 4,53abc
T14	8,67 ± 1,89abcd	13,167 ± 3,05abc	17,67 ± 4,72abcd	
	Moyenne V2	8,56 ± 2,87a	12,11 ± 3,93a	17,30 ± 5,57a
	Pr(>F)V	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	0,2305ns	0,4805ns	0,3968ns

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis, Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de Tukey à la probabilité P< 0,05

III.1.4.1.2. Effet des traitements sur les paramètres épidémiologiques en serre

III.1.4.1.2.1. Incidence de la maladie

L'incidence de la maladie a varié en fonction des variétés et traitements au cours du temps (Tableau XXII). A 6, 8 et 10 SAS, des effets significatifs ont été enregistrés entre l'interaction variété *traitement ($P < 0,001$), entre les traitements ($P < 0,001$) et entre les variétés ($P < 0,001$). A 6 SAS la variété TGX-1835-10 E a enregistré des incidences nulles avec différents traitements mycorhiziens contrairement aux témoins de la variété R3 qui ont enregistré des incidences les plus élevées (100 %). Les traitements mycorhizés monospore (T3) et composites (T5, T7, T8, T10, T13 et T14) ont enregistré des incidences nulles contrairement au témoin absolu qui a enregistré l'incidence la plus élevée (91,67 %). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré la plus faible incidence (9,37 %) par rapport à la variété R3 (22,92 %). A 10 SAS la variété TGX-1835-10 E a enregistrée la plus faible incidence (16,67 %) avec les traitements composites mycorhizés (T6 et T12) contrairement aux témoins des deux variétés qui ont enregistrés les incidences les plus élevées (100 %). Les traitements composites mycorhiziens (T6, T7, T14) et monospore (T3) ont enregistrés respectivement l'incidence la plus faible (50 %) contrairement aux témoins (100 %). Concernant l'effet variété, la variété R3 a l'incidence la plus élevée (77,91 %) par rapport à la variété TGX-1835-10 E (58,33 %).

Tableau XXII. Variation de l'incidence(%) en fonction des traitements et des variétés

Variétés	Traitements	6SAS	8SAS	10SAS
Variété TGX-1835-10 E (V1)	T0+	66,67± 5,77c	83,33 ± 11,54ab	100a
	T0-	83,33 ± 11,54b	100a	100a
	T1	0e	33,33 ± 2,88de	83,33 ± 11,54ab
	T2	0e	16,67 ± 1,52ef	66,67 ± 5,77bc
	T3	0e	33,33 ± 2,88de	33,33 ± 2,88de
	T4	0e	16,67 ± 1,52ef	83,33 ± 11,54ab
	T5	0e	16,67 ± 1,52ef	66,67 ± 5,77bc
	T6	0e	0f	16,67 ± 1,52e
	T7	0e	0f	33,33 ± 1,52de
	T8	0e	50 ± 4,35cd	66,67 ± 5,77bc
	T9	0e	33,33 ± 2,88de	50 ± 4,35cd
	T10	0e	83,33 ± 11,54ab	83,33 ± 11,54ab
	T11	0e	16,67 ± 1,52ef	66,67 ± 5,77bc
	T12	0e	16,67 ± 1,15ef	16,67 ± 1,52e
	T13	0e	33,33 ± 1,52de	50 ± 4,35cd
T14	0e	0f	33,33 ± 2,88de	
	MoyenneV1	9,37 ± 1,76b	36,45 ± 7,51b	58,33 ± 17,32b
Variété R3 (V2)	T0+	100 a	100a	100a
	T0-	100 a	100a	100a
	T1	66,67 ± 5,77c	66,67 ± 5,77bc	100a
	T2	16,67 ± 1,5d	50 ± 4,5cd	66,67 ± 5,77bc
	T3	0e	66,67 ± 5,77bc	66,67 ± 2,88bc
	T4	16,67 ± 2,08d	83,33 ± 11,54ab	100a
	T5	0e	83,33 ± 10,69ab	66,67 ± 5,77bc
	T6	16,67 ± 1,52d	66,67 ± 5,77bc	83,33 ± 7,63ab
	T7	0e	66,67 ± 5,77bc	66,67 ± 4,16bc
	T8	0e	66,67 ± 5,77bc	66,67 ± 5,77bc
	T9	16,67 ± 1,15d	66,67 ± 7,63	83,33 ± 11,54ab
	T10	0e	66,67 ± 8,50bc	66,67 ± 5,77bc
	T11	16,67 ± 2,88d	50 ± 4,58cd	66,67 ± 7,63bc
	T12	16,67 ± 2,88d	100a	100a
	T13	0e	66,67 ± 5,77bc	66,67 ± 5,77bc
T14	0e	66,67 ± 5,77bc	66,67 ± 7,63bc	
	Moyenne V2	22,92 ± 7,31a	72,92 ± 12,67a	77,91 ± 15,12a
	Pr(>F)V	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis, Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de Tukey à la probabilité P< 0,05

III.1.4.1.2.2. Sévérité de la maladie

La sévérité de la maladie observée a varié en fonction des variétés et traitements au cours du temps (Tableau.XXIII). Des effets significatifs ont été observés entre l'interaction variété*traitement ($P < 0,001$), entre les traitements ($P < 0,001$) et entre les variétés ($P < 0,001$) durant toute la période d'observation. A 6 SAS la variété TGX-1835-10 E a enregistré des sévérités nulles avec les différents traitements mycorhiziens contrairement aux témoins de la variété R3 qui ont enregistré des sévérités les plus élevées (100 %). Les traitements composites mycorhiziens (T5, T7, T8, T13, T14) et monospore (T3) ont enregistré des sévérités nulles, par rapport au témoin absolu qui a enregistré la sévérité la plus élevée (14,08 %). En ce qui concerne l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré une faible sévérité (1,50 %) par rapport à la variété R3 (2,47 %). A 10 SAS, les plus faibles sévérités (1,67 ; 1,67 et 2 %) ont été obtenues chez la variété TGX-1835-10 E avec les traitements composites mycorhiziens (T6, T9, T14 respectivement) et la plus élevée (73,33 %) avec le témoin absolu, suivi du traitement au fongicide (28,17 %) chez la variété R3. Les traitements composites mycorhiziens (T9, T6, T14, T13 et T7) ont enregistré les plus faibles sévérités (1,67 ; 2,66 ; 2,83 ; 2,83 et 3,08 % respectivement) par rapport au témoin absolu qui a enregistré la sévérité la plus élevée (59,83 %). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a la sévérité de la maladie la plus faible (6,75 %) par rapport à la variété R3 (10,94 %).

Tableau XXIII. Variation de la sévérité en fonction des variétés et des traitements

Variétés	Traitements	6SAS	8SAS	10SAS
TGX-1835-10 E(V1)	T0+	10,83 ± 0,28c	14,17 ± 1,04c	15,16 ± 2,46d
	T0-	13,17 ± 0,76b	23,33 ± 2,46a	46,33 ± 2,30b
	T1	0g	1,67 ± 0,28 efgh	9,33 ± 0,76ef
	T2	0g	3,33 ± 0,28e	3,33 ± 0,76h
	T3	0g	3,33 ± 0,57e	3,83 ± 0,52gh
	T4	0g	3,33 ± 0,76e	3,33 ± 0,57h
	T5	0g	0,67 ± 0,14 gh	3,67 ± 0,76gh
	T6	0g	0h	1,67 ± 0,28h
	T7	0g	0h	2,67 ± 0,28h
	T8	0g	3,83 ± 0,28e	6 ± 0,86 fgh
	T9	0g	0,67 ± 0,14gh	1,67 ± 0,28h
	T10	0g	2efgh	4,33 ± 0,57fgh
	T11	0g	1 ± 0,25fgh	5,67 ± 0,76fgh
	T12	0g	1,67 ± 0,28efgh	2,33 ± 0,57h
	T13	0g	2,33 ± 0,28efg	2,67 ± 0,57h
T14	0g	0h	2 ± 0,86h	
	Moyenne V1	1,50 ± 0,56b	3,83 ± 1,84b	6,75 ± 4,30b
R3(V2)	T0+	15 ± 0,50a	20,33 ± 0,28b	28,17 ± 0,76c
	T0-	15,50 ± 0,86a	25 ± 0,5a	73,33 ± 2,88a
	T1	2,33 ± 0,57d	7,50 ± 0,86d	9,17 ± 0,76ef
	T2	0,67 ± 0,2fg	3,17 ± 0,76e	5,83 ± 0,28fgh
	T3	0g	8,67 ± 0,57d	4,50 ± 0,43fgh
	T4	1 ± 0,5ef	7 ± 0,5d	12 ± 0,50de
	T5	0g	7,17 ± 1,04d	8,67 ± 0,57efg
	T6	0,67 ± 0,2fg	2,67 ± 0,28efg	3,67 ± 0,57gh
	T7	0g	1,67 ± 0,28efgh	3,50 ± 0,86gh
	T8	0g	2,33 ± 0,76efg	3 ± 0,50h
	T9	1 ± 0,25ef	2,50 ± 0,86efg	1,67 ± 0,28h
	T10	0g	2 ± 0,86efgh	4,50 ± 0,50fgh
	T11	1,33 ± 0,57ef	3 ± 0,5e	3,83 ± 0,28gh
	T12	1,67 ± 0,28de	3,33 ± 0,57e	6,50 ± 0,50fgh
	T13	0g	2,67 ± 0,57efg	3 ± 0,86h
T14	0g	2 ± 0,5efgh	3,67 ± 0,57gh	
	Moyenne V2	2,47 ± 0,88a	6,36 ± 1,18a	10,94 ± 8,02a
	Pr(>F)V	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis, Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de Tukey à la probabilité P< 0,05

III.1.4.1.3. Effet des traitements sur la fréquence et l'intensité de mycorhization en serre

La Fréquence et l'intensité de mycorhization ont varié en fonction des traitements et des variétés. Elles ont été plus élevées chez les traitements mycorhizés et nulle chez le témoin positif et négatif (Tableau.XXIV). Concernant la fréquence de mycorhization, des effets significatifs ont été enregistrés entre l'interaction variété*traitement ($P < 0,001$), et entre les traitements ($P < 0,001$). La fréquence de mycorhization la plus élevée a été obtenue chez la variété TGX-1835-10 E avec le traitement composite mycorhizien T13 et monospore T3; et nulle chez les témoins des deux variétés. Les traitements mycorhiziens (T3, T13) ont enregistré des fréquences les plus élevées (68,33 et 63,33 % respectivement), valeur qui a été nulle chez les témoins non mycorhizés. Il n'existe pas de différence significative entre les variétés pour ce paramètre.

En ce qui concerne l'intensité de mycorhization, les intensités les plus élevées (11,33 ; 10,7 %) ont été obtenues respectivement chez la variété TGX-1835-10 E (V1) et R3 (V2) avec le traitement composite mycorhizien T13. Elle a été nulle chez les témoins non mycorhizés des deux variétés. Les traitements composites mycorhiziens (T13, T12) et monospore (T3) ont enregistré respectivement les intensités les plus élevées (8,95 ; 5,55 et 4,83 %). Il n'existe pas de différence significative entre les variétés.

Tableau XXIV. Variation de la fréquence et de l'intensité de mycorhization en fonction des variétés et des traitements

Variétés	Traitements	Fréquence (%)	Intensité (%)
Variété TGX-1835-10 E (V1)	T0-	0k	0h
	T0+	0k	0h
	T1	60 ± 10bcd	4,30 ± 0,1e
	T2	30 ± 10ij	0,30 ± 0,1h
	T3	73,33 ± 10,60a	4,36 ± 0,06e
	T4	46,67 ± 7,64efg	1,26 ± 0,06g
	T5	50 ± 10defg	1,20 ± 0,26g
	T6	63,33 ± 10,41abc	4,33 ± 0,06e
	T7	53,33 ± 7,57cdef	3,26 ± 0,9f
	T8	56,67 ± 10,41cde	1,1 ± 0,61g
	T9	56,67 ± 7,02cde	4,27 ± 0,06e
	T10	60 ± 10bcd	1,23 ± 0,31g
	T11	56,67 ± 6,50cde	4,26 ± 0,06e
	T12	40 ± 10ghi	0,40 ± 0,08h
	T13	73,33 ± 10,41a	11,33 ± 0,06a
	T14	63,33 ± 9,45abc	1,43 ± 0,06g
	Moyenne V1	48,95 ± 9,92a	2,69 ± 1,77a
Variété R3 (V2)	T0-	0k	0h
	T0+	0k	0h
	T1	56,67 ± 6,03cde	4,26 ± 0,06e
	T2	33,33 ± 7,57hi	0,33 ± 0,06h
	T3	63,33 ± 8,50abc	5,30 ± 0,9d
	T4	43,33 ± 8,50fgh	1,23 ± 0,06g
	T5	70 ± 10ab	1,5 ± 0,1g
	T6	20 ± 3j	0,20 ± 0,06h
	T7	63,33 ± 6,81abc	4,33 ± 0,06e
	T8	60 ± 10bcd	1,4 ± 0,1g
	T9	63,33 ± 10,41abc	4,33 ± 0,15e
	T10	33,33 ± 5,78hi	0,33 ± 0,06h
	T11	53,33 ± 6,66cdef	4,23 ± 0,06e
	T12	70 ± 10ab	10,7 ± 0,95b
	T13	53,33 ± 5,86cdef	6,56 ± 0,6c
	T14	33,33 ± 4,93hi	0,33 ± 0,06h
	Moyenne V2	44,79 ± 11,58a	2,82 ± 1,56a
	Pr(>F)V	0,354ns	0,06754ns
	Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	<0,001***	<0,001***

P: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '!' Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P< 0,05

III.1.4.1.4. Effet des traitements sur le rendement des variétés en serre

Les rendements en grains obtenus en t/ha variaient en fonction des traitements et des variétés. Des différences significatives ont été enregistrées entre les rendements en grains (t/ha) des variétés et des traitements mycorhizés par rapport aux témoins non mycorhizés (témoins négatif (T0⁻) et positifs (T0⁺)). Les rendements les plus élevées (1,17; 1,10 et 1,09 t/ha) ont été obtenus chez la variété TGX-1835-10 E (V1) avec les traitements T13, T3, T6, respectivement et le plus faible (0,05 t/ha) obtenue chez le témoin absolu de la variété R3 (Fig. 34). Ainsi on a noté une augmentation de 515,78; 478,94 et 473,68 % par rapport au témoin négatif (T0⁻) respectivement chez la variété TGX-1835-10 E (V1). Indépendamment des traitements d'une part et des variétés d'autre part, il n'existe pas de différence significative entre les variétés. Les traitements T13, T6, T14 se sont avérés meilleurs.

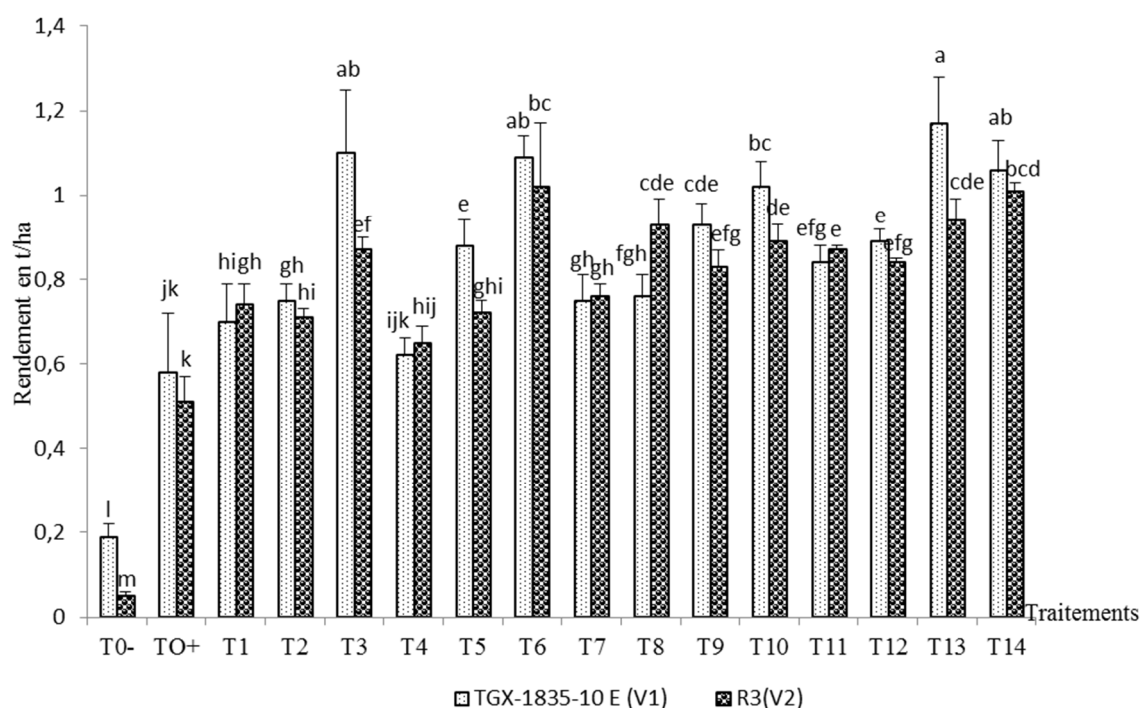


Fig. 34. Rendements en t/ha des variétés en fonction des différents traitements en serre (T0⁻: témoin négatif; T0⁺: traitement fongicide; T₁: *Gigaspora gigantea*, T₂: *Denticutata nigra*, T₃: *Entrophopora*, T₄: *Scutellospora Cerradessis*, T₅: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra*, T₆: *Gigaspora gigantea* + *Entrophopora*, T₇: *Gigaspora gigantea* + *Scutellospora Cerradessis*, T₈: *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₉: *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₀: *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₁: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₁₂: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₃: *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₄: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*)

III.1.4.1.5. Corrélation entre les paramètres évalués

La matrice de corrélation de Pearson entre les paramètres étudiés en serre a permis de montrer ou non des corrélations entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques, de croissance et de rendement étudiés (Tableau XXV). Des corrélations significativement positives (**) ont été observées entre les fréquences de mycorhization (F) et les autres paramètres. Toutefois, de fortes corrélations négatives (-0,467** ; -0,668**) ont été enregistrées entre les fréquences de mycorhization, les incidences et les sévérités de la maladie respectivement. En effet, l'augmentation de la fréquence de mycorhization a entraîné une baisse considérable des incidences et sévérités de la maladie. Egalement, des coefficients de corrélation significativement négatifs ont été enregistrés entre les incidences (-0,500** ; -0,462** ; -0,365*) et les paramètres de croissance (HT, DC et NF respectivement) d'une part et d'autre part entre les sévérités (-0,908** -0,548** -0,672** -0,645**) et les différents paramètres (Rdt, HT, DC et NF respectivement). Ainsi l'augmentation de l'incidence et la sévérité de la maladie a été corrélée à une baisse considérable de ces différents paramètres. Cette corrélation n'est pas significative entre les intensités de mycorhization et les différents paramètres étudiés.

Tableau. XXV. Matrice des coefficients de corrélation (Pearson) entre les paramètres étudiés en serre.

Légende: F: fréquence de mycorhization en (%); IM: intensité de mycorhization; I: incidence de la maladie; S: sévérité de la maladie en (%); NF: nombre de feuille; DC: diamètre au collet en mm; HT: hauteur de la tige en cm; Rdt: rendement en t/ha

	F	IM	I	S	NF	DC	HT	Rdt
F	1							
IM	0,635**	1						
I	-0,467**	-0,106ns	1					
S	-0,668**	-0,277 ns	0,492**	1				
NF	0,623**	0,281ns	-0,365*	-0,645**	1			
DC	0,638**	0,203ns	-0,462**	-0,672**	0,931**	1		
HT	0,596**	0,184ns	-0,500**	-0,548**	0,449**	0,572**	1	
Rdt	0,554**	0,228ns	-0,336ns	-0,908**	0,539**	0,557**	0,464**	1

**P<0,01. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral). *P<0,05. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

III.1.4.1.6. Effet de la mycorhization sur la synthèse des composés biochimiques et l'activité enzymatique en serre

III.1.4.1.6.1. Variation de la teneur en phénol

La teneur en phénol obtenue après dosage variait en fonction des traitements chez les deux variétés en serre. Cette teneur en phénol a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles chez les traitements mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de la synthèse des phénols totaux. Cette augmentation était de l'ordre de 93,33 et 23,40 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 134,37 et 31,57 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et le traitement au fongicide respectivement (Fig. 35).

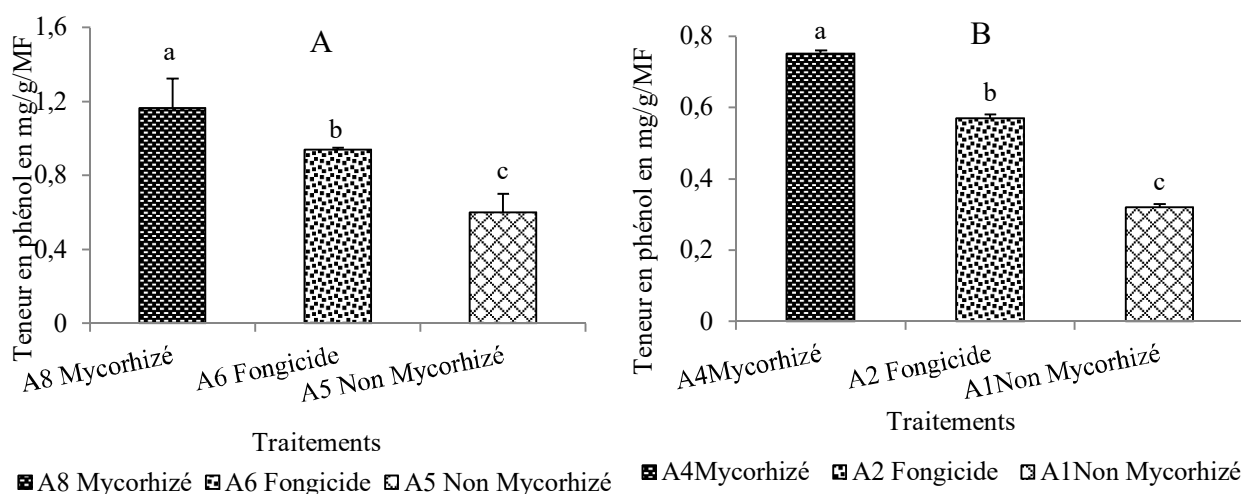


Fig. 35. Variation de la teneur en phénol total en fonction des traitements en serre (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

Tout comme en serre la teneur en phénol obtenue après dosage variait en fonction des traitements chez les deux variétés en champ. Cette teneur a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles chez les traitements mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés dans les deux sites. L'inoculation des CMA a favorisé une augmentation de la synthèse des phénols totaux. A Mfou Cette augmentation était de l'ordre de 240 et 210 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 60,90 et 26,62 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et le traitement au fongicide respectivement (Fig. 36). Cette augmentation à Banganté était de l'ordre de 168,25 et 80,74 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 99,39 et 38,23 % pour la variété R3 (Fig. 37)

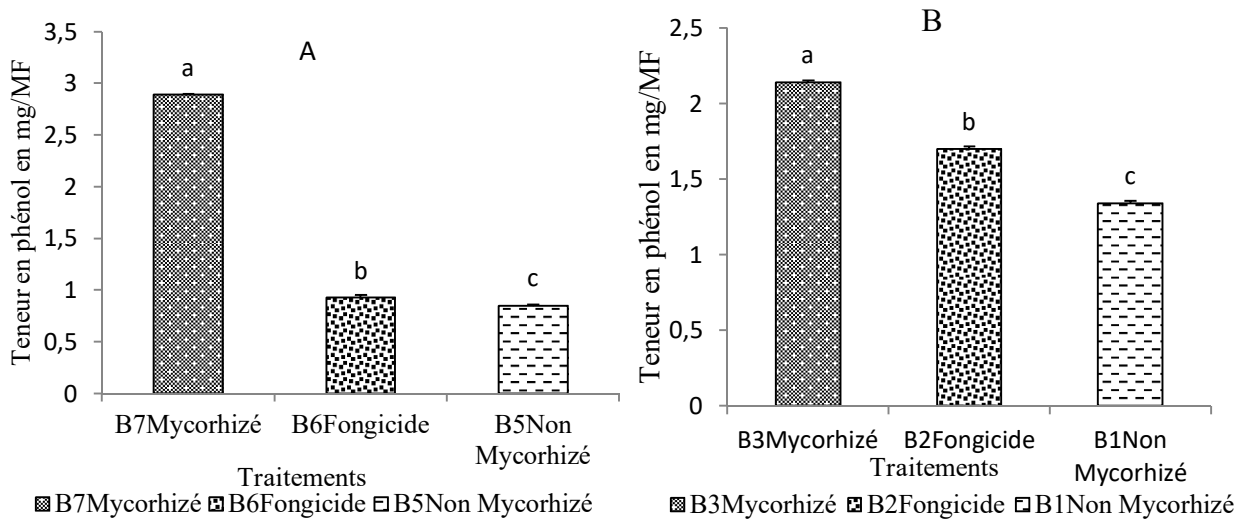


Fig. 36. Variation de la teneur en phénol total en fonction des traitements dans le site de Mfou (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

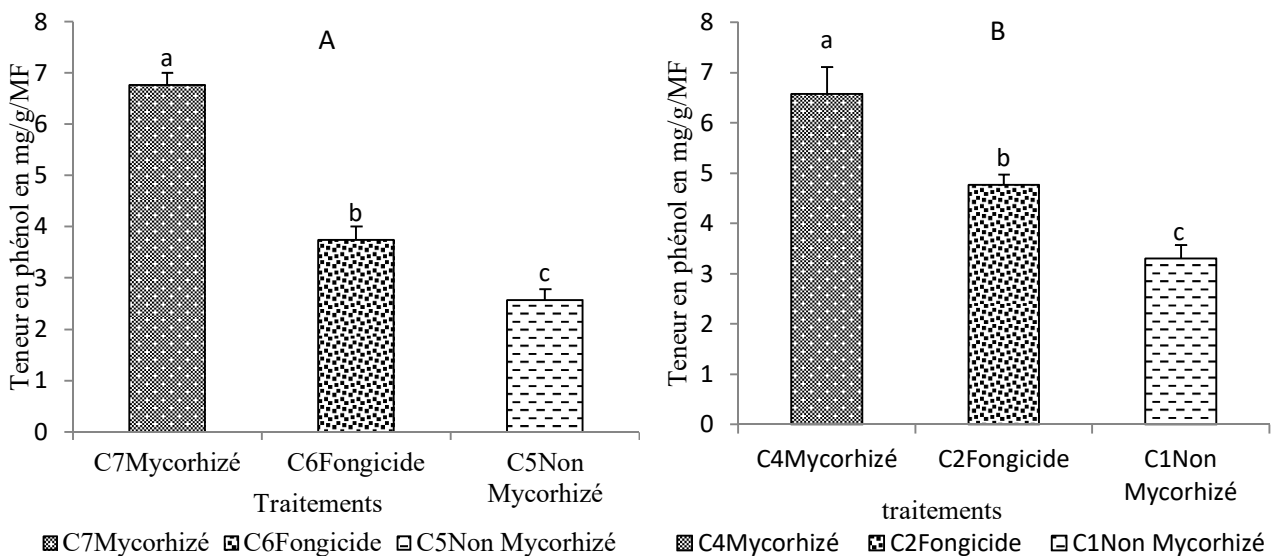


Fig. 37. Variation de la teneur en phénol total en fonction des traitements dans le site de Bangangté (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

III.1.4.1.6.2. Variation de la teneur en flavonoïde

La teneur en flavonoïde obtenue en mg/g de matière fraîche variait en fonction des traitements chez les deux variétés en serre. Cette teneur a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes mycorhizées par rapport aux non mycorhizées. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de la synthèse des flavonoïdes. Cette augmentation a été en moyenne de 138,88 et 45,76 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 114,28 et 52,54 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement au fongicide respectivement (Fig. 38).

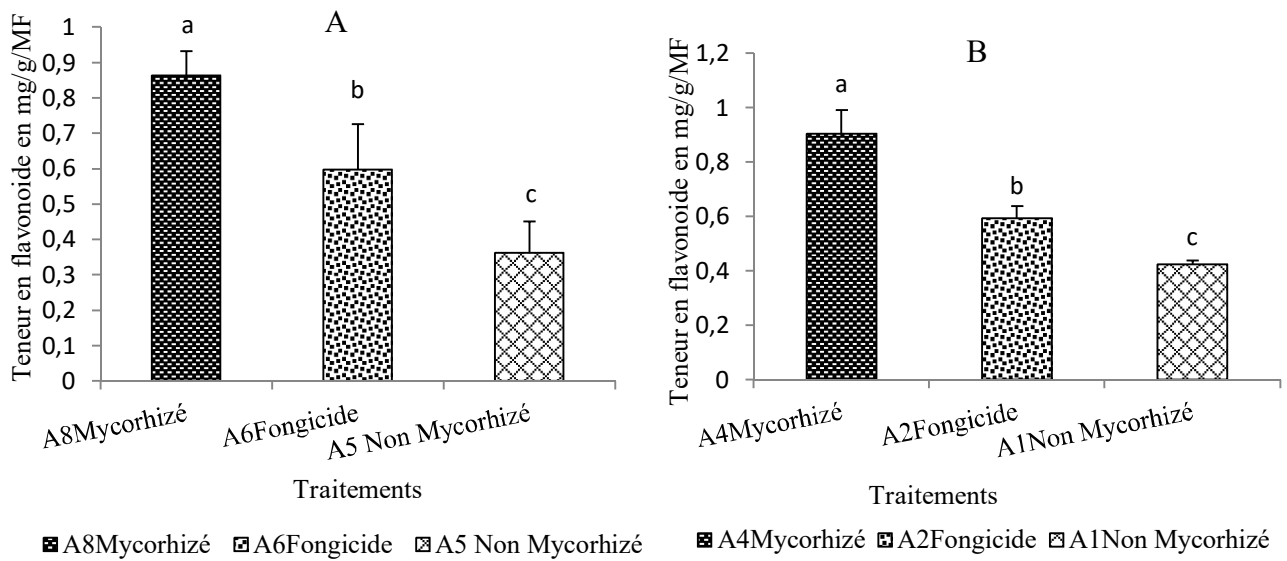


Fig. 38. Variation de la teneur en flavonoïde en fonction des traitements en serre (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

En champ, la teneur en flavonoïde obtenue en mg/g de matière fraîche variait en fonction des traitements chez les deux variétés ; teneur significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes mycorhizées. L'augmentation de la synthèse des flavonoïdes dans les deux sites a été favorisée par l'inoculation des CMA. A Mfou Cette augmentation a été en moyenne de 233,33 et 59,57 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 75,71 et 26,80 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement fongicide respectivement (Fig. 39). A Banganté, elle était de l'ordre de 145,35 et 81,74 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 120,52 et 81,66 % pour la variété R3 (Fig. 40).

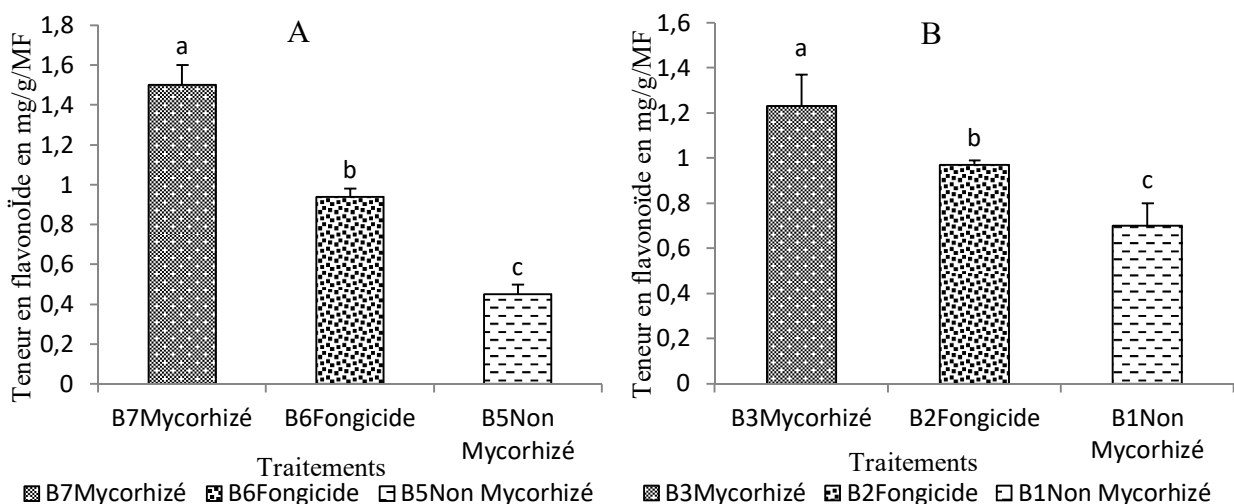


Fig. 39. Variation de la teneur en flavonoïde en fonction des traitements à Mfou (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

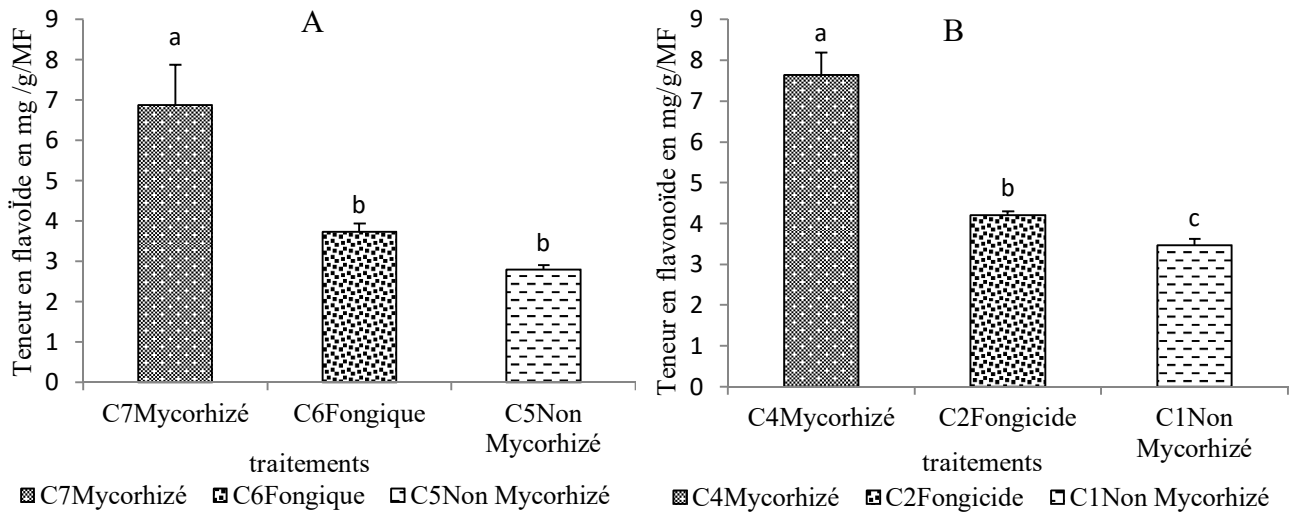


Fig. 40. Variation de la teneur en flavonoïde en fonction des traitements à Bangangté (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

III.1.4.1.6.3. Variation de la teneur en protéine

La teneur en protéines totales obtenue en mg/g de matière fraîche, variait en fonction des traitements chez les deux variétés. Cette teneur a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes mycorhizées par rapport aux non mycorhizées. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de la synthèse de protéines totales. Cette augmentation a été de 48,82 et 29,37 % pour la variété TGX-1835-10 E et de 87,58 et 35,65 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement au fongicide de contact respectivement (Fig. 41).

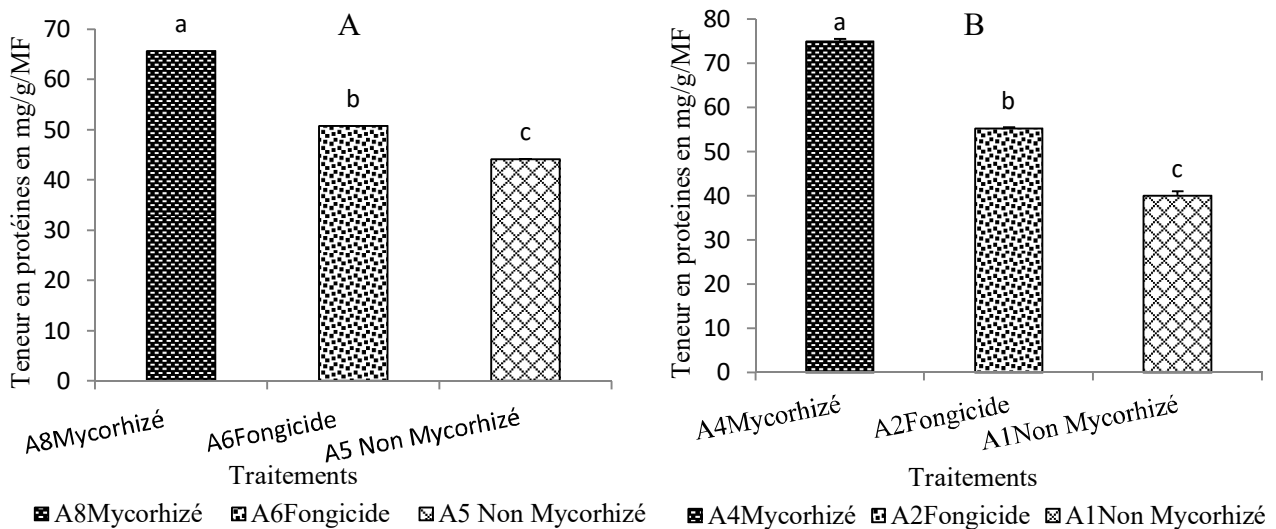


Fig.41. Variation de la teneur en protéines totales en fonction des traitements en serre (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

La teneur en protéines totales obtenue en champ, variait en fonction des traitements chez les deux variétés. Cette teneur a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes mycorhizées dans les deux sites. L'inoculation des CMA a conduit à une augmentation de la synthèse de protéines totales. A Mfou Cette augmentation a été de 59,27 et 30,29 % pour la variété TGX-1835-10 E et de 66,98 et 22,49 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement au fongicide de contact respectivement (Fig. 42). A Banganté, elle était de l'ordre de 76,49 et 49,33 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 27,68 et 11,71 % pour la variété R3 (Fig. 43).

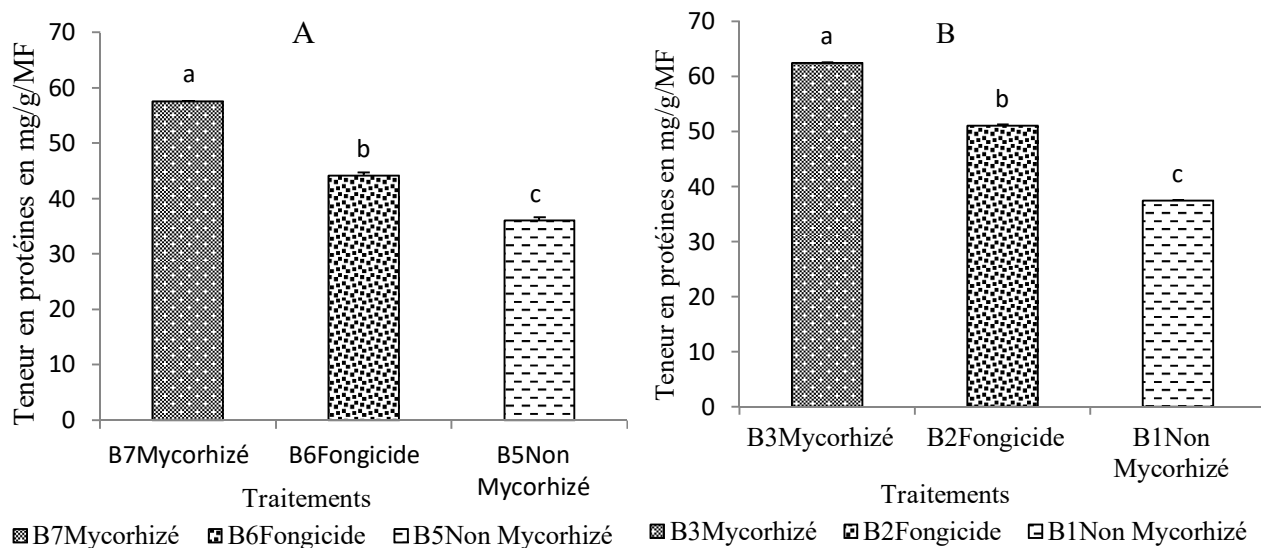


Fig. 42. Variation de la teneur en protéines totales en fonction des traitements à Mfou (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

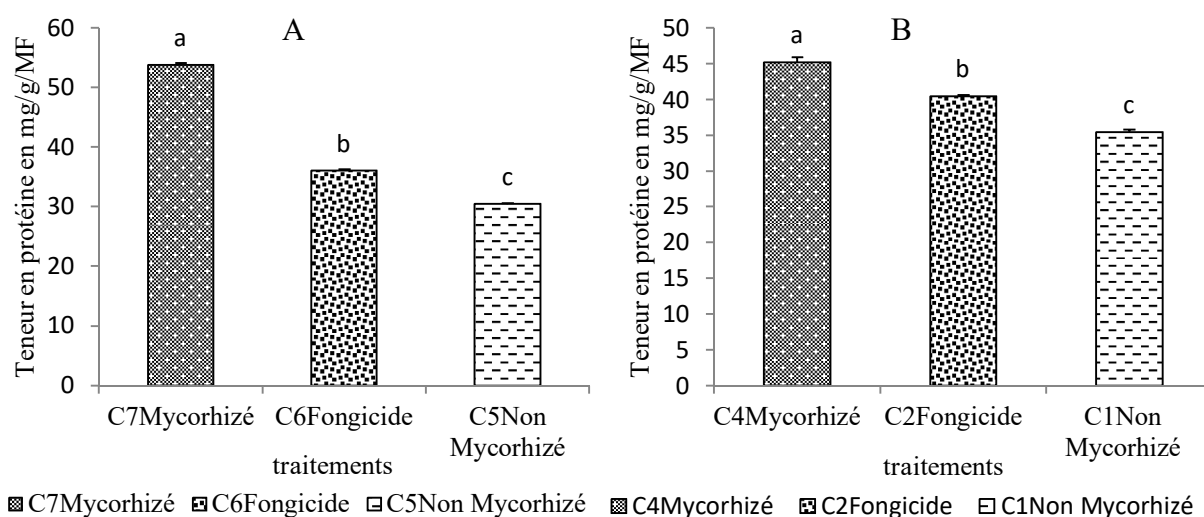


Fig. 43. Variation de la teneur en protéines totales en fonction des traitements à Banganté (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

III.1.4.1.6.4. Variation de la teneur en tannins

La teneur en tannins obtenue en mg/g de matière fraîche variait en fonction des traitements chez les deux variétés en serre. Cette teneur en tannins a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes mycorhizées par rapport aux feuilles des plantes non mycorhizées. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de la synthèse des tannins. Cette augmentation a été de 145,71 et 29,71 % pour la Variété TGX-1835-10 E, de 329,26 et 120 % pour la variété R3 par rapport aux témoins négatif et traité au fongicide respectivement (Fig. 44).

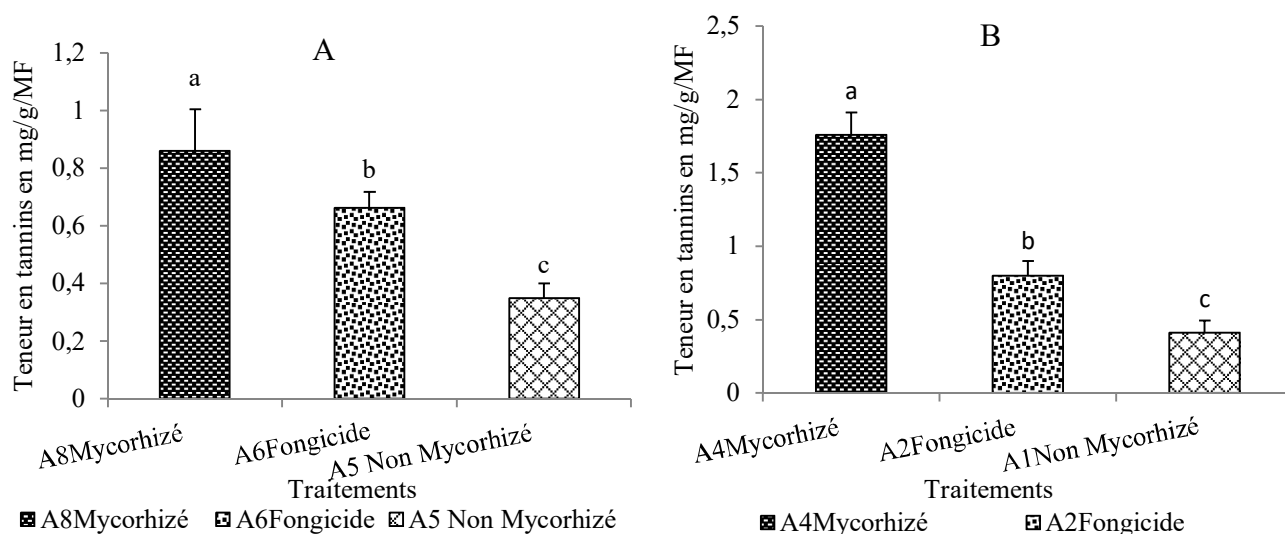


Fig.44. Variation de la teneur en tannins en fonction des traitements en serre (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

En champ, la teneur en tannins obtenue en mg/g de matière fraîche variait en fonction des traitements chez les deux variétés. Cette teneur en tannins a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes de soja mycorhizées par rapport aux feuilles des plantes non mycorhizées dans les deux sites. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de la synthèse des tannins. A Mfou Cette augmentation a été de 375 et 111,11 % pour la variété TGX-1835-10 E et de 125 et 46,34 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement au fongicide de contact respectivement (Fig. 45). Cette augmentation à Banganté était de l'ordre de 84,30 et 44,37 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 177,24 et 76,04 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et le traitement au fongicide respectivement (Fig. 46)

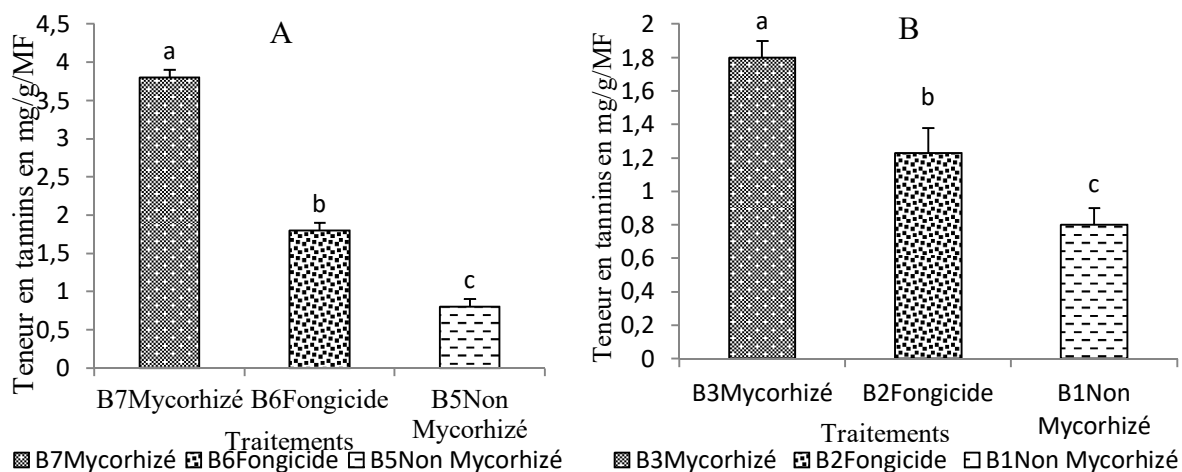


Fig.45. Variation de la teneur en tannins en fonction des traitements à Mfou (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

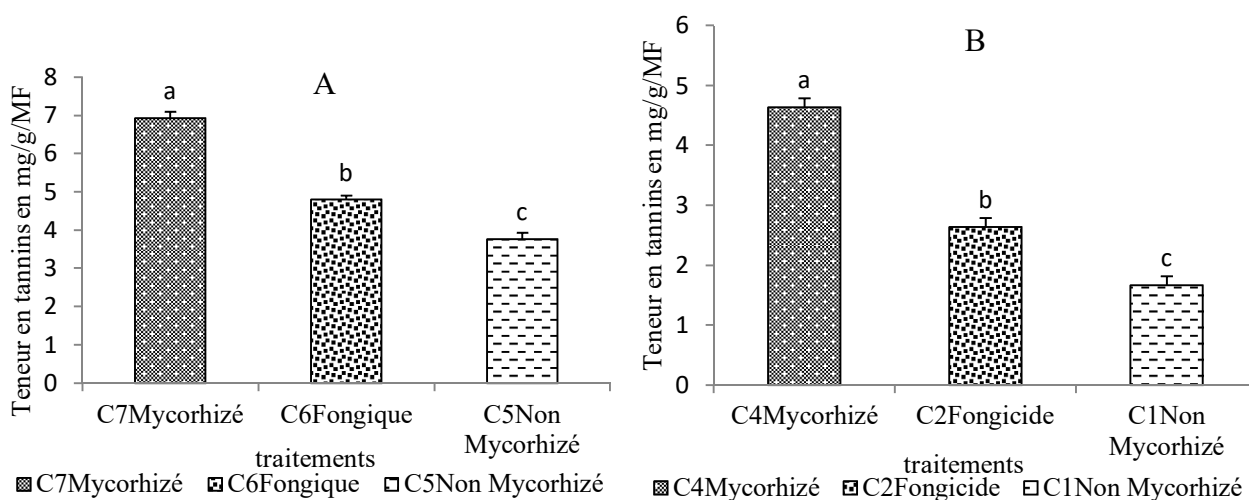


Fig.46. Variation de la teneur en tannins en fonction des traitements à Bangangté (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

III.1.4.1.6.5. Variation de l'activité de la Glucanase

L'activité enzymatique de la glucanase a varié en fonction des traitements chez les deux variétés en serre. Cette activité a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles de tous les plantes mycorhizées par rapport aux traitements non mycorhizés. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de l'activité enzymatique de la glucanase. Des taux d'augmentation de l'ordre de 47,70 et 2,22 % pour la variété TGX-1835-10 E et de 11906,65 et 88,50 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et le traitement au fongicide respectivement ont été enregistrés (Fig. 47).

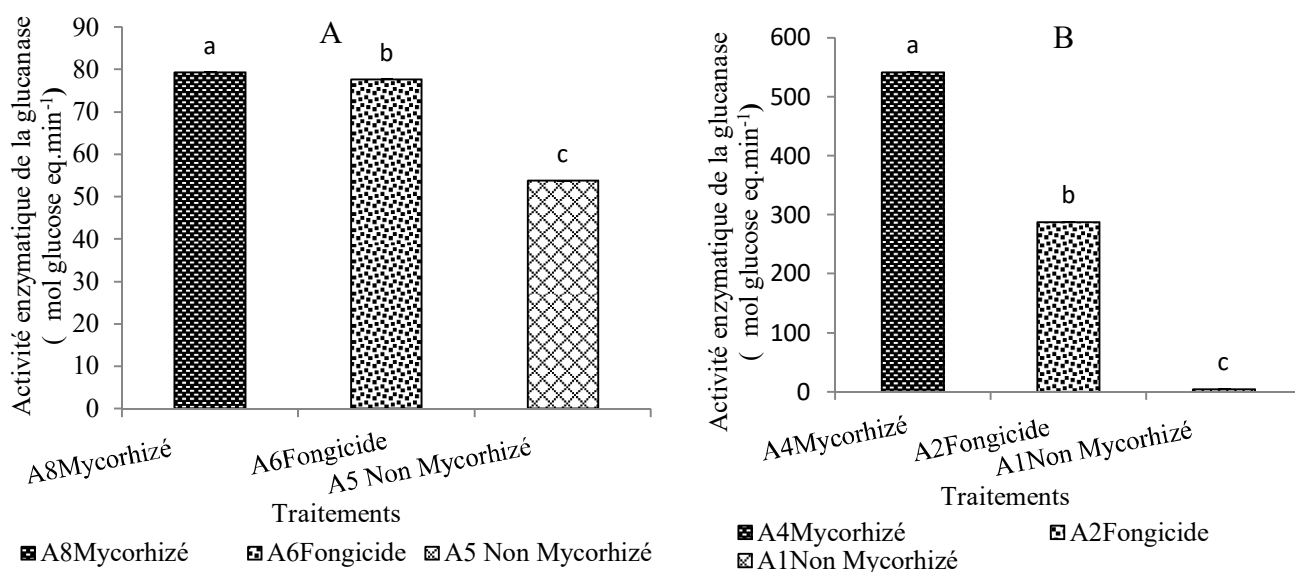


Fig.47. Variation de l'activité enzymatique de la glucanase en fonction des traitements en serre (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

Tout comme en serre, l'activité enzymatique de la glucanase a varié en fonction des traitements chez les deux variétés en champ. Cette activité a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles de tous les plantes mycorhizées par rapport aux traitements non mycorhizés dans les deux sites. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de l'activité enzymatique de la glucanase. A Mfou, des taux d'augmentation de l'ordre de 187,44 et 4,55 % pour la variété TGX-1835-10 E et de 255 et 239 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et le traitement au fongicide respectivement ont été enregistrés (Fig. 48). Dans le site de Bangangté des taux augmentation de 124,66 et 8,30 % pour la variété TGX-1835-10 E et de 450,9 et 343,17 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et le traitement au fongicide respectivement ont été enregistrés (Fig. 49)

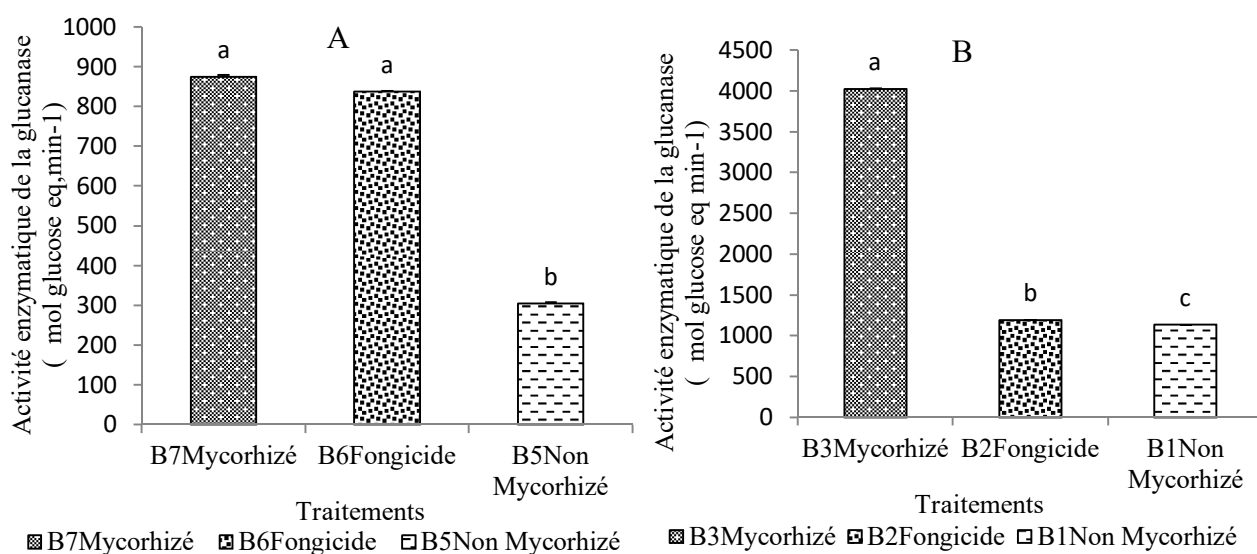


Fig 48. Variation de l'activité enzymatique de la glucanase en fonction des traitements à Mfou (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

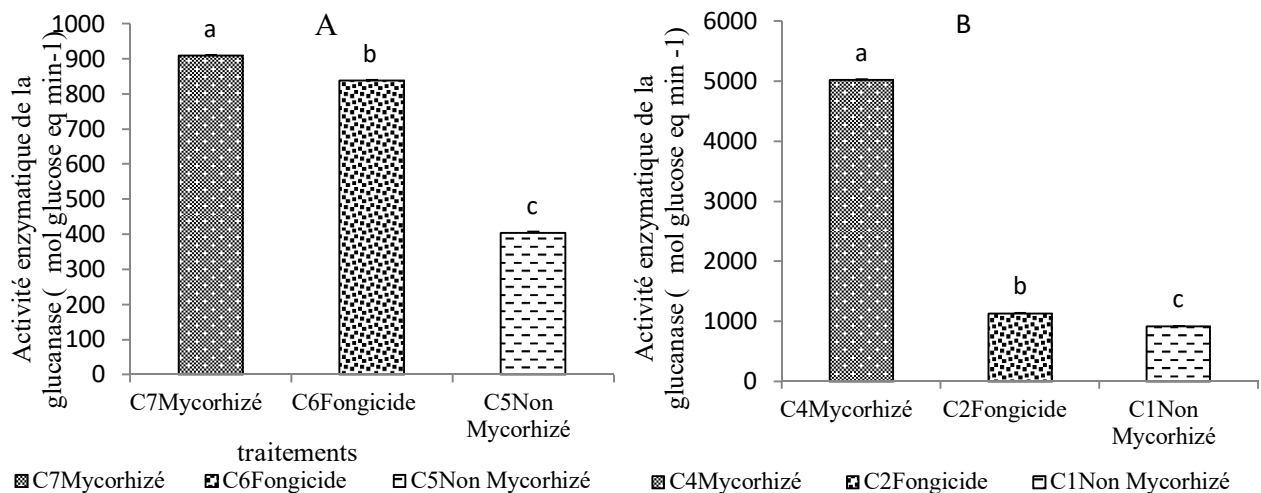


Fig.49. Variation de l'activité enzymatique de la glucanase en fonction des traitements à Bangangté (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

III.1.4.1.6.6. Variation de l'activité des polyphénoloxydases

L'activité des polyphénoloxydases (PPO) dans l'extrait protéique a varié en fonction des traitements chez les deux variétés en serre. Cette activité a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) chez les plantes mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de l'activité des polyphénoloxydases de l'ordre de 370,58 et 100 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 81 et 29,64 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement fongicide respectivement (Fig. 50).

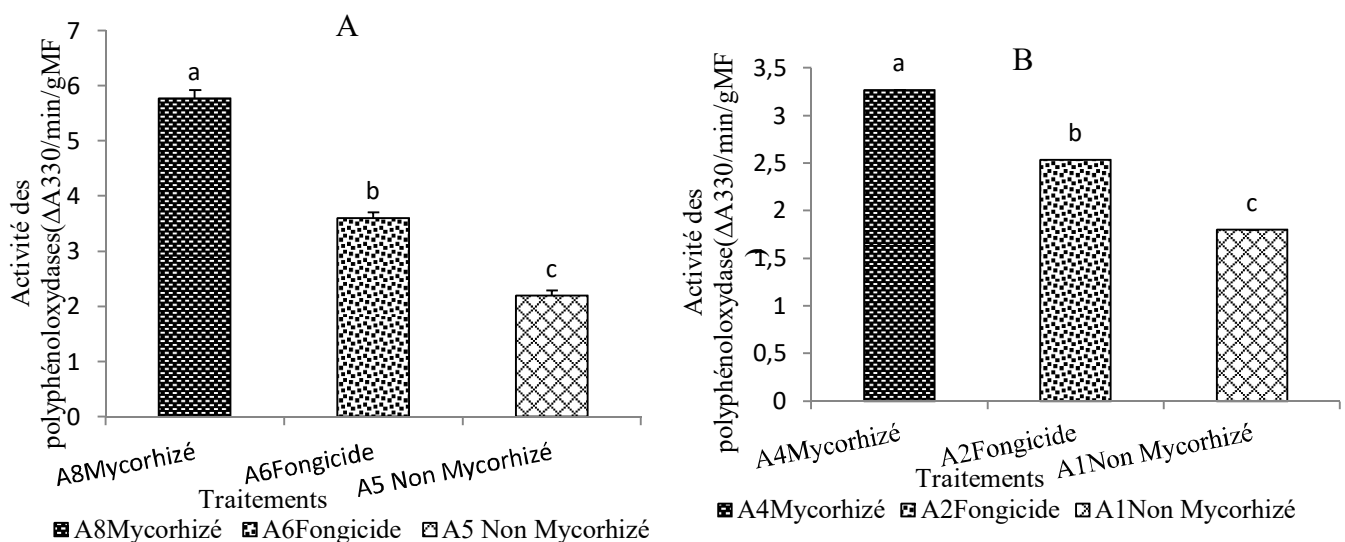


Fig. 50. Variation de l'activité des polyphénoloxydases en fonction des traitements en serre (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

En champ, l'activité des polyphénoloxydases (PPO) dans l'extrait protéique des feuilles a varié en fonction des traitements, des variétés et des sites. Cette activité a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) chez les plantes mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés dans les

deux sites. L'inoculation des plantes de soja avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de l'activité des polyphénoloxydases de l'ordre de 220,55 et 224 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 158 et 50 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement fongicide respectivement dans le site de Mfou (Fig. 51). A Bangangté cette augmentation a été de l'ordre de 117,17 et 29,67 % pour la variété TGX-1835-10 E, de 180 et 72,46 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et au traitement fongicide respectivement (Fig. 52).

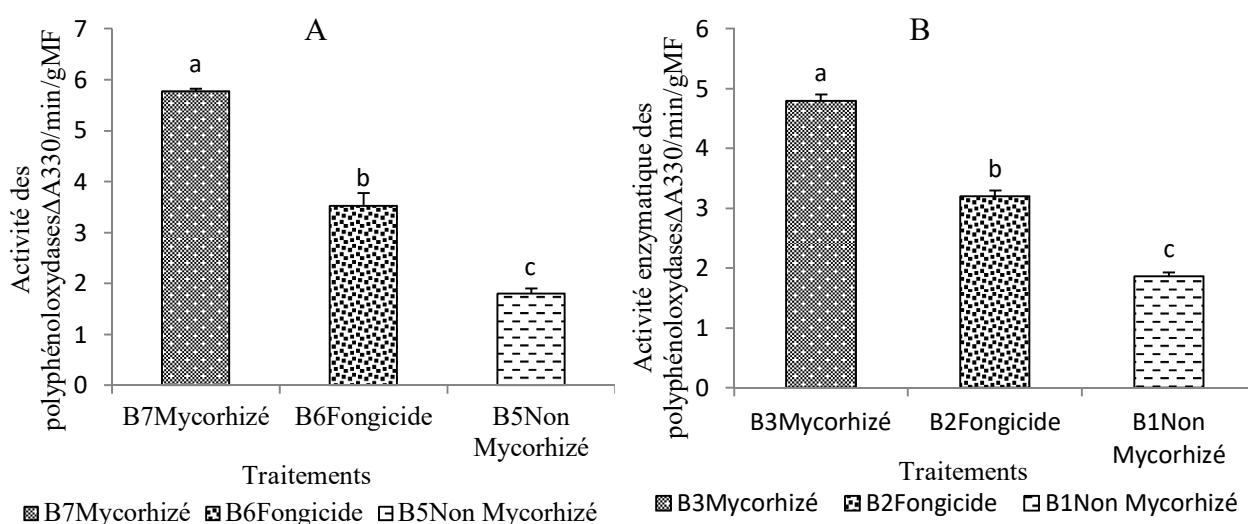


Fig.51. Variation de l'activité des polyphénoloxydases en fonction des traitements à Mfou (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

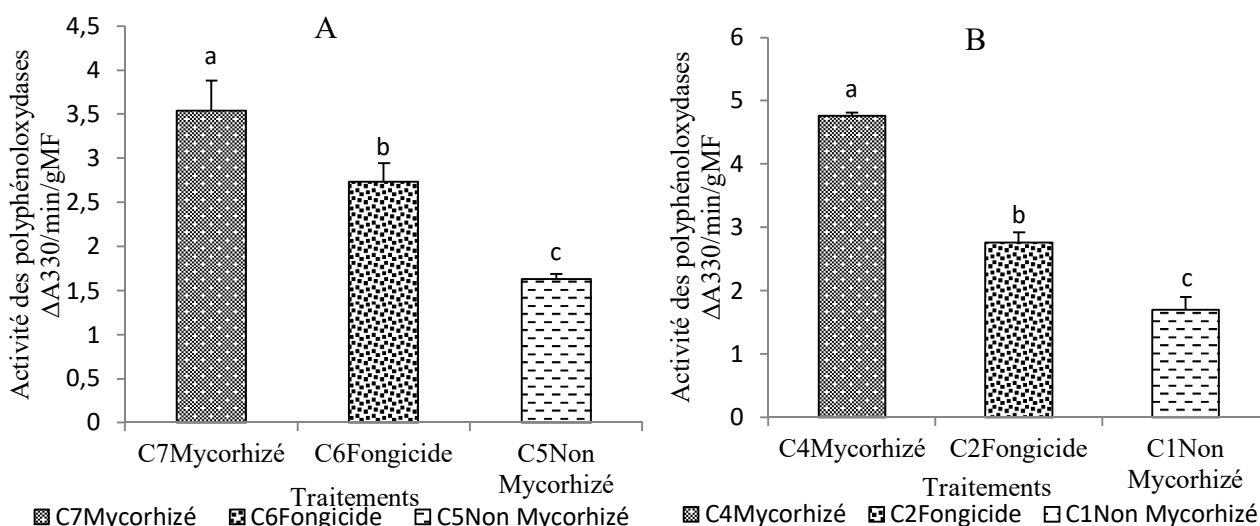


Fig.52. Variation de l'activité des polyphénoloxydases en fonction des traitements à Bangangté (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

III.1.4.1.6.7. Variation de l'activité enzymatique des peroxydases

L'activité enzymatique des peroxydases dans l'extrait protéique des feuilles variait en fonction des traitements chez les deux variétés en serre. Elle a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes mycorhizées (0,4 et 0,8 UE/min/g de MF), suivi des plants

traités au fongicide de synthèse (0,23 et 0,4 UE/min/g de MF) par rapport au témoin non mycorhizé (0,07 et 0,17 UE/min/g de MF) chez la variété TGX-1835-10 E et la variété R3 respectivement. L'inoculation avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de l'activité enzymatique des peroxydases. Ainsi on a noté une augmentation de 447,94 et 73,91 % pour la variété TGX-1835-10 E; de 1900 et 370,58 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et positif respectivement (Fig. 53).

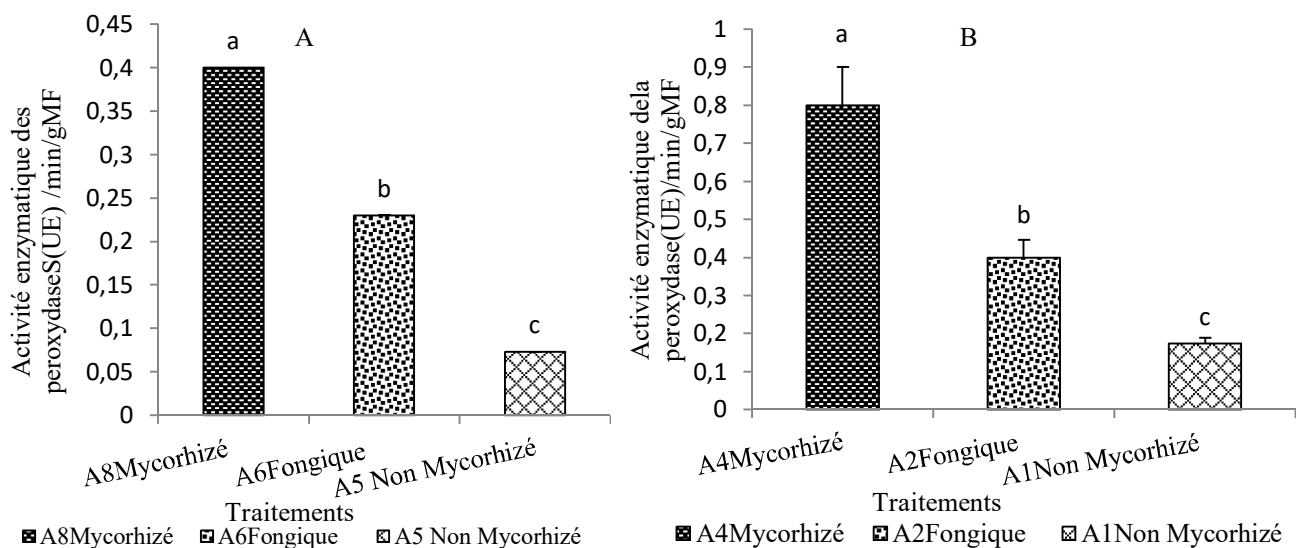


Fig.53. Variation l'activité enzymatique des peroxydases en fonction des traitements en serre (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

En champ, l'activité enzymatique des peroxydases (POX) dans l'extrait protéique des feuilles des deux variétés de soja variait en fonction des traitements dans les deux sites d'étude. Dans le site de Mfou l'activité de la POX a été significativement plus élevée ($P < 0,05$) dans les feuilles des plantes mycorhizées (0,83 UE/min/g de MF), suivi des plants traités au fongicide de synthèse (0,5 UE/min/g de MF) par rapport au témoin non mycorhizé (0,32 UE/min/g de MF) chez la variété R3. Pour la variété TGX-1835-10 E l'activité enzymatique des feuilles des plants mycorhizés (0,81 UE/min/g de MF) et le traitement au fongicide (0,86 UE/min/g de MF) sont statistiquement identiques et plus élevées comparativement à celle des feuilles des plants témoins (0,041 UE/min/g de MF). Ainsi on a noté une augmentation de 1875,6 % pour la variété TGX-1835-10 E; de 159,37 et 66 % pour la variété R3 par rapport au témoin négatif et positif respectivement (Fig. 54). A Bangangté aucune différence significative n'a été observé entre l'activité enzymatique dans les feuilles des plants mycorhizés (0,73 et 0,72 UE/min/g de MF) et le traitement au fongicide (0,65 et 0,77 UE/min/g de MF) chez la variété TGX-1835-10 E et la variété R3 respectivement. Par contre une différence significative a été observée entre les traitements mycorhizés et le témoin absolu. L'inoculation avec les CMA s'est caractérisée par une augmentation de l'activité enzymatique des peroxydases. Des

taux d'augmentation de l'ordre de 311,76 et 204,34 % ont été enregistrés respectivement chez le deux variété par rapport au témoin négatif (Fig. 55).

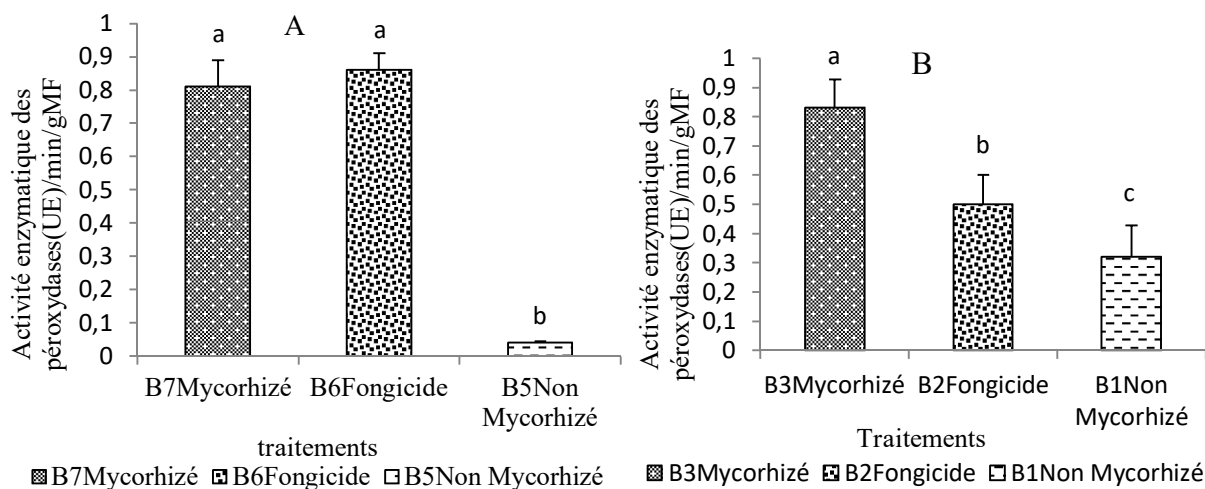


Fig.54. Variation l'activité enzymatique des peroxydases en fonction des traitements à Mfou (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

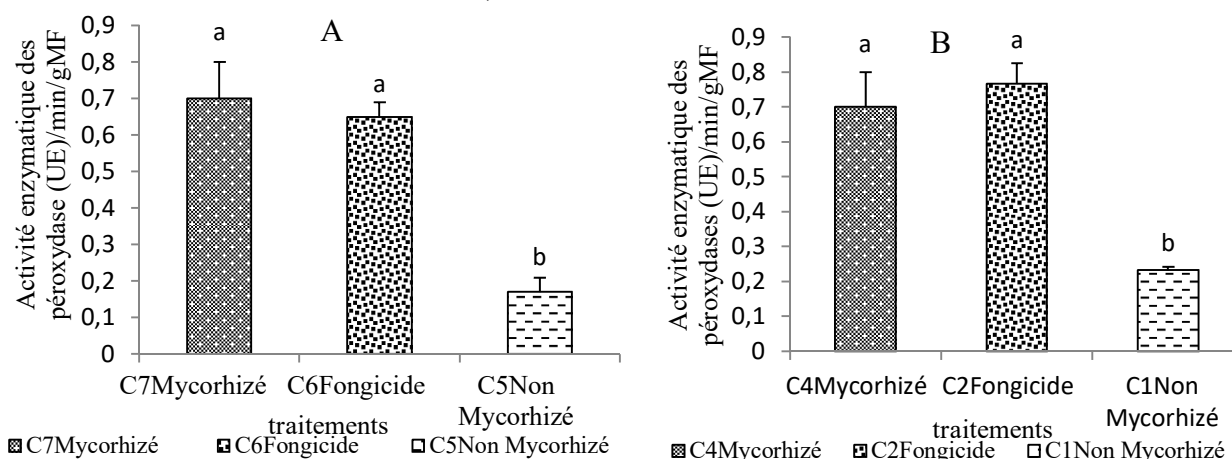


Fig.55. Variation l'activité enzymatique des peroxydases en fonction des traitements à Bangangté (A: variété TGX-1835-10 E; B: variété R3).

III.1.4.1.7. Corrélation entre les paramètres de mycorhization, épidémiologique, la synthèse des composés biochimiques et l'activité enzymatique

La matrice de corrélation de Pearson entre les paramètres étudiés a permis de montrer des corrélations significatives entre les paramètres de mycorhizations, épidémiologiques, biochimiques et les activités enzymatiques étudiés (Tableau XXVI). Des corrélations significativement positives (*) au niveau 0,05 ont été observées entre les fréquences de mycorhization (F), les paramètres biochimiques et les activités enzymatiques (Polyphénoloxydases et de la peroxydase). Le paramètre fréquence de mycorhization a été fortement corrélé (0,806* ; 0,797* ; 0,752* ; 0,717* ; 0,782* ; 0,779*) à la synthèse des flavonoïdes, des protéines totales, des phénols, des tannins et à l'activité enzymatique (PPO ; Per) respectivement. En effet, la synthèse de ces différents composés était proportionnelle à la

fréquence de mycorhization. Le paramètre intensité de mycorhization (IM) a été fortement corrélée ($0,905^{**}$; $0,877^{**}$) au niveau 0,01 à la synthèse des protéines totales et à l'activité enzymatique de la peroxydase respectivement. Au seuil de 5 %, cette IM a été significativement corrélée ($0,730^*$) à la synthèse des flavonoïdes. Des corrélations significativement positives (**, *) ont été enregistrées entre l'incidence, la sévérité de la maladie et la synthèse des composés phénoliques, flavonoïdes, protéiques et les activités enzymatiques de la polyphénoloxydases et de la peroxydase. Toutefois, de fortes corrélations négatives ($-0,852^{**}$; $-0,762^*$; $-0,761^*$; $-0,762^*$; $-0,815^*$) ont été enregistrées entre l'incidence de la maladie et les paramètres biochimiques (Phe ; FL; PPO; Per respectivement) d'une part et d'autre part ($-0,740^*$; $-0,788^*$; $-0,723^*$) entre la sévérité de la maladie, des phénols, protéines totales et l'activité enzymatique de la polyphénoloxydases respectivement. Ainsi la synthèse de ces différents composés était inversement proportionnelle à l'incidence et à la sévérité. L'augmentation de la synthèse de ces composés a entraîné une baisse considérable de l'incidence et la sévérité de la maladie.

Tableau XXVI. Matrice des coefficients de corrélation (Pearson) entre les paramètres étudiés en serre.

Légende : F :fréquence de mycorhization ;IM :intensité de mycorhization ;I :incidence de la maladie en (%) ; S: sévérité de la maladie en (%); Phe : phénol en mg/g MF; FL : flavonoïdes en mg/g MF ;Tan :Tannins en mg/g MF ; PT : Protéines Totaux en mg/g MF ; Glu : Glucanases ; PPO : polyphénoloxydases ; Per : Peroxydase en UE/min/g MF

	F	IM	I	S	Phe	FL	Tan	PT	Glu	PPO	Per
F	1										
IM	0,802*	1									
I	-0,962**	-0,731*	1								
S	-0,683ns	-0,617ns	0,640ns	1							
Phe	0,756*	0,431ns	-0,852**	-0,740*	1						
FL	0,806*	0,730*	-0,762*	-0,661ns	0,643ns	1					
Tan	0,717*	0,625ns	-0,594ns	-0,582ns	0,415ns	0,903**	1				
P T	0,797*	0,905**	-0,698ns	-0,788*	0,507ns	0,842**	0,748*	1			
Glu	0,292ns	0,653ns	-0,156ns	-0,430ns	-0,074ns	0,598ns	0,647ns	0,755*	1		
PPO	0,782*	0,539ns	-0,765*	-0,723*	0,806*	0,527ns	0,327ns	0,633ns	-0,006ns	1	
Per	0,779*	0,877**	-0,815*	-0,681ns	0,678ns	0,841**	0,631ns	0,831*	0,550ns	0,524ns	1

**P<0,01. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral). *P<0,05. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

III.1.4.1.8. Analyse qualitative des composés phénoliques

L'analyse qualitative des composés phénoliques par chromatographie liquide à haute pression a montré une variation et une surexpression de certains composés phénoliques en fonction des traitements et variétés (Fig. 56). Les traitements aux CMA ont entraîné l'accumulation spécifique de huit nouveaux composés au niveau des feuilles de soja après inoculation des CMA et infection par *Phakopsora pachyrhizi* chez les deux variétés. Ces nouveaux composés sont caractérisés par la présence des pics à des temps de rétention bien défini. Chez la variété R3 (V2) ces pics ont été obtenus respectivement aux temps $t = 2,56$ min ; $t = 2,72$ min ; $t = 3,06$ min ; $t = 3,13$ min ; $t = 4,8$ min ; $t = 5,3$, $t = 5,4$ min ; $t = 5,5$ min. Chez la variété TGX-1835-10E ils ont été obtenus aux temps $t = 2,82$ min ; $t = 2,84$ min ; $t = 2,9$ min ; $t = 2,97$ min ; $t = 4,8$ min ; $t = 4,9$ min ; $t = 5,2$ min ; $t = 5,4$ min.

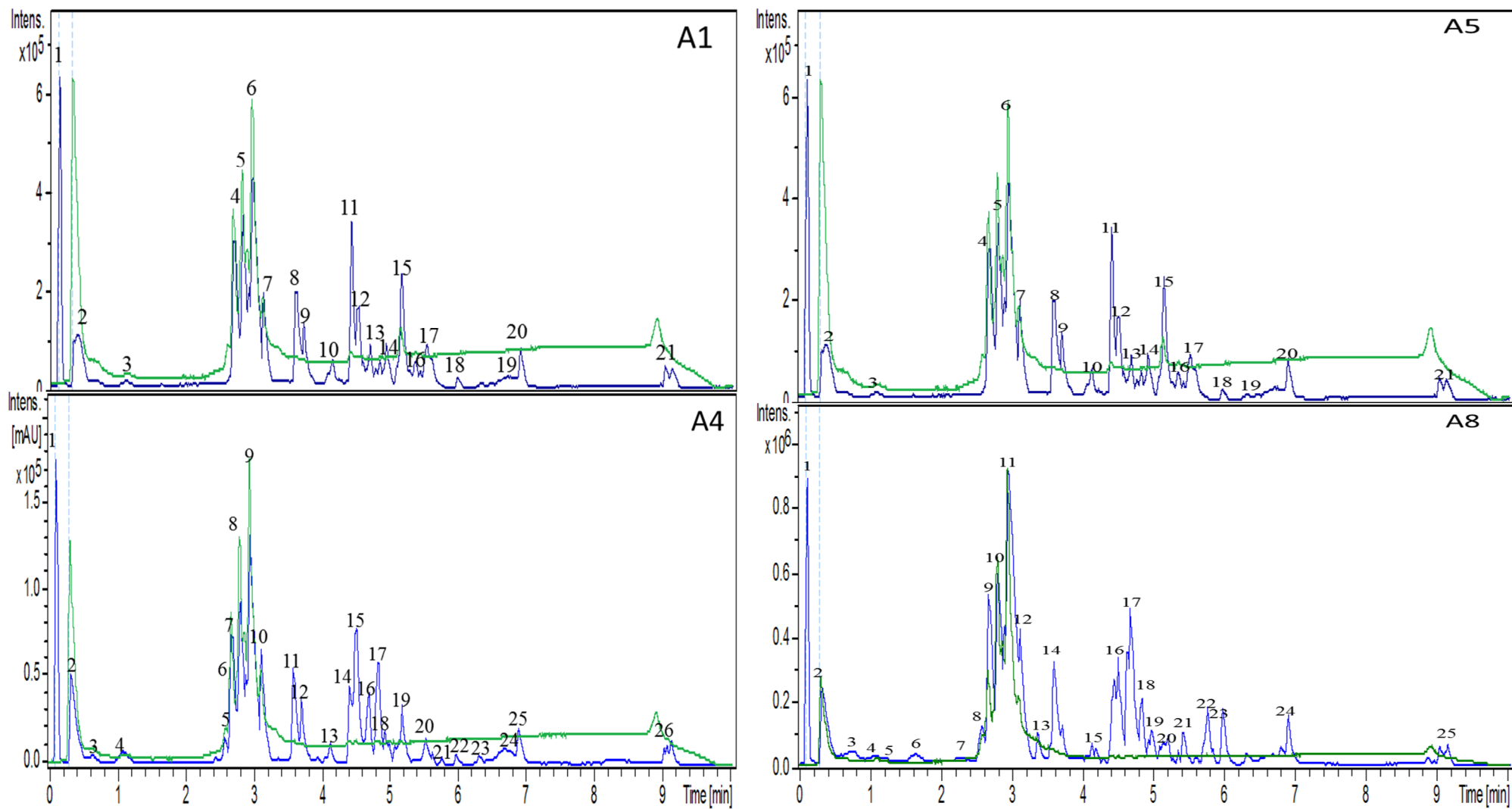


Fig. 56. Chromatogramme des composés phénoliques dans les feuilles de soja après inoculation des CMA et infection par *Phakopsora pachyrhizi*.

A1: traitement témoins variété R3 (V2); A4 : traitement mycorhizé variété R3 (V2) ; A5 : traitement témoins variété TGX-1835-10E (V1) ; A8 : traitement mycorhizé variété TGX-1835-10E (V1).

III.1.4.1.9. Composés identifiés par HPLC-DAD-MS+

L'analyse du couplage DAD-HPLC-MS+ a présenté une diversité de familles de composés phénoliques en fonction des traitements et variétés (Tableau XXVII et XXVIII). Ces composés variaient en fonction des extraits des feuilles non mycorhizées et mycorhizées chez les deux variétés. Au total 8 composés probables ont été identifiés dans les extraits des feuilles non mycorhizées et 12 composés dans ceux des feuilles mycorhizées de la variété R3 (V2). Chez la variété TGX-1835-10E (V1), 6 composés probables ont été identifiés dans les extraits de feuilles des plantes non mycorhizées contre 16 composés dans ceux des feuilles des plantes mycorhizées. Parmi ces composés figurent certains qui ont été identifiables à la fois dans les feuilles de soja non mycorhizées et mycorhizées, et d'autres spécifiques au traitement mycorhizé chez les deux variétés. Plusieurs autres composés non pas pu être identifiés autant chez la variété V1 que chez la V2. Ainsi huit (08) nouveaux composés ont été identifiés chez les feuilles mycorhizées de chacune des deux variétés appartenant à différentes familles. Parmi ces composés, la daidzeine, Genisteine, Daidzein-7-glucoside, Genistein malonylglycoside (famille des isoflavones), Rhamnazine ou dimethyl-o-ellagic, Isorhmnetine-hexoside-methylpentoside (famille des flavones), dérivé de l'acide cafféique et acide carboxylique Brevifoline (dérivé des tanins) ont été identifiés chez la variété R3 (V2) (Tableau XXVII). Chez la variété V1, la daidzeine, Genisteine, Genisteine 4',7-Odiglucosidemethylmalonylated, Genisteine acetylglycoside, Quercetine 3-o-glucoside-7-o-rhamnoside (famille des isoflavones), Rhamnazine et Gallocatéchine (famille des flavones) ont été identifiés (Tableau XXVIII).

Tableau XXVI. Composés phénoliques identifiés dans les feuilles de soja non mycorhizé et mycorhizé de la variété R3(V2) par DAD-HPLC

traitements	Tr (minutes)	m/z (M+H) ⁺	Detecteur UV	composés probables	Formule brute	Famille
Non mycorhizé V2	5,6	607,2946	218-270-411	Epicatechine-ethyl dimer		
	5,5	391,2853	218-415	Trans-resveratrol		dérivé du resveratrol
	5,4	371,3158	218-415	Trihydroxycinnamoylquinic acid isomer		flavonoïde
	5,3	293,2479	411	Epicatechine	C ₁₅ H ₁₄ O ₆	flavonoïde
	5,2	609,2725	218-411	Quercetine 3-o-glucoside-7-o-rhamnoside	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	isoflavone
	5	309,2429	218-423	Sinapoylcholine dimer Isomer 1	C ₁₆ H ₂₄ N ₅	flavonoïde
	4,8	309,2076	218-415	Sinapoylcholine dimer Isomer 1	C ₁₆ H ₂₄ N ₅	flavonoïde
	4,5	517,3354	214	Dicaffeoyl quinic acid ou 1,5 dicaffeoyl quinic acid	C ₂₅ H ₂₄ O ₁₂	
	3,8	181,1223	202-274	Acide caféique	C ₉ H ₈ O ₄	flavonoïde
	3,3	179,1721	202-235	Non identifié	NI	NI
	3,1	227,164	202	Non identifié	NI	NI
	2,9	315,155	1555	Non identifié	NI	NI
	Mycorhizé V2	5,6	607,2917	222-270	Epicatechine-ethyl dimer	
5,5		623,2852	222-270	Isorhamnetine/ Isorhamnetine-hexoside-methylpentoside	C ₁₆ H ₁₂ O ₇	flavonol
5,4		637,2644	218-423	Dérivé de l'acide caféique		
5,3		293,247	411	Brevifolin carboxylic acid	C ₁₃ H ₈ O ₈	dérivé des tanins
5,2		609,2693	218-415	Quercetine 3-o-glucoside-7-o-rhamnoside	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	isoflavone
5,1		609,2698	218-415	Quercetine 3-o-glucoside-7-o-rhamnoside	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	isoflavone
5		309,242	218-423	Sinapoylcholine dimer Isomer 1	C ₁₆ H ₂₄ N ₅	flavonoïde
4,9		279,2314	423	Non identifié	NI	NI
4,8		331,2236	218-423	Rhamnazine ou dimethyl-o-ellagic acid	C ₁₇ H ₁₄ O ₇	flavonol
4,7		295,2263	218-423	Non identifié	NI	NI
3,13		416	206-335	Daidzein-7-glucoside	C ₂₁ H ₂₀ O ₉	isoflavone
3,06		518	210--335	Genistein malonylglycoside	C ₂₄ H ₂₂ O ₁₃	isoflavone
2,72		270	214-335	Genisteine	C ₁₅ H ₁₀ O ₅	isoflavone
2,56	254,01	210-335	daidzeine	C ₁₅ H ₁₀ O ₄	isoflavone	

NI : non identifié ; Tr : temps de rétention

Tableau XXVII. Composés phénoliques identifiés dans les feuilles de soja non mycorhizé et mycorhizé de la variété TGX-1835-10 E (V1) par DAD-HPLC

Traitements	Tr(minutes)	m/z(M+H)+	Detecteur UV	composés probables	Formule brute	Famille
Non mycorhizé V1	5,6	607,2942	222-371-411	Epicatechine-ethyl dimer		
	5,5	623,2878	218-411	Isorhmnetine ou Isorhmnetine-hexoside-methylpentoside	C ₁₆ H ₁₂ O ₇	flavonol
	5,3	293,2481	411	Brevifolin carboxylic acid	C ₁₃ H ₈ O ₈	dérivé des tanins
	5	309,2429	218-411	Sinapoylcholine dimer Isomer 1	C ₁₆ H ₂₄ NO ₅	flavonoïde
	4,9	279,2322	423	Non identifié	NI	NI
	4,8	291,2323	218-423	epicatechine	C ₁₅ H ₁₄ O ₆	flavonoïde
	4,7	295,23	214-274	Non identifié	NI	NI
	3,3	579,1717	198-270-331	Proanthocyanidine B1	C ₃₀ H ₂₆ O ₁₂	flavonoïde
	2,9	505,1557	198-270-331	Non identifié	NI	NI
	2,8	480,1561	198-286-323	Non identifié	NI	NI
Mycorhizé V1	5,6	607,2927	222-411	Epicatechine -ethyl dimer		
	5,5	623,2869	218-411	Isorhmnetine ou Isorhmnetine -hexoside-methylpentoside/ Isorhamnetin 3-glucoside-7-rhamnoside	C ₁₆ H ₁₂ O ₇	flavonol
	5,4	637,2683	218-435	Dérivé de l'acide caféique		
	5,3	293,2473	411	Brevifolin carboxylic acid	C ₁₃ H ₈ O ₈	dérivé des tanins
	5,2	609,2714	218-415	Quercetine 3-o-glucoside-7-o-rhamnoside	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	isoflavone
	5,1	609,2714	218-415	Quercetine 3-o-glucoside-7-o-rhamnoside	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	isoflavone
	5	309,2425	218-439	Sinapoylcholine dimer Isomer 1	C ₁₆ H ₂₄ NO ₅	flavonoïde
	4,9	307,2226	218-423	Gallocatéchine	C ₁₅ H ₁₄ O ₇	flavonol
	4,8	331,223	423	Rhamnazine	C ₁₇ H ₁₄ O ₇	flavonol
	4,7	295,2269	423	Non identifié	NI	NI
	3,3	579,1707	202-339	Proantocyanidine B1	C ₃₀ H ₂₆ O ₁₂	flavonoïde
	2,97	254,02	210-339	daidzeine	C ₁₅ H ₁₀ O ₄	isoflavone
	2,9	565,1562	210-335	Genisteine 4',7-Odiglucosidemethylmalonylated	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₀	isoflavone
	2,84	474	214-339	Genistein acetylglycoside	C ₁₅ H ₁₀ O ₅	isoflavone
	2,82	270	214-339	genisteine	C ₁₅ H ₁₀ O ₅	isoflavone

NI : non identifié ;Tr :temps de rétention

:

III.1.4.2. Effet des souches de CMA sur le développement de *Phakopsora pachyrhizi* en champ

III.1.4.2.1. Effet des Traitements /variétés sur les paramètres de croissances en champ

III.1.4.2.1.1. Hauteur de la tige

La hauteur de la tige observée pendant les différentes prises de donnée augmentait en fonction des traitements et variétés au cours du temps dans les deux sites (Tableau. XXIV). A 6 SAS dans le site de Bangangté, aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement, entre les traitements et entre les variétés. A 10 SAS, aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement. Néanmoins la variété R3 a enregistré les hauteurs les plus élevées ($36,83 \pm 3,42$; $36,20 \pm 3,99$; $35,33 \pm 3,74$ et $35,33 \pm 3,74$) avec les traitements mycorhizés composites T6, T13 et monospore T2 respectivement par rapport au traitement au fongicide ($20,67 \pm 2,08$) et témoin absolu ($20,73 \pm 2,19$) de la variété TGX-1835-10 E. Un effet significatif a été observé entre les traitements ($<0,001$) et entre les variétés ($<0,001$). Les traitements mycorhizés monospores (T2) et composites (T13 et T6) ont enregistré les hauteurs les plus élevées ($31,67 \pm 4,94$; $31,20 \pm 6,38$ et $31,18 \pm 6,91$ cm respectivement), contrairement au traitement au fongicide (T0+) et témoins absolu (T0-) qui ont enregistré les hauteurs les plus faibles ($24 \pm 4,78$ et $24,30 \pm 5,36$ cm). Concernant l'effet variété, la variété R3 a enregistré la hauteur la plus élevée ($31,81 \pm 4,21$ cm) par rapport à la variété TGX-1835-10 E ($23,57 \pm 3,24$ cm). Il n'existe pas d'effet significatif entre l'interaction variété x traitement.

Dans le site de Mfou un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,05$) et entre les variétés ($< 0,05$) à 6 SAS. La variété TGX-1835-10 E a enregistré les hauteurs les plus élevées ($13,22 \pm 0,83$; $12,89 \pm 0,19$ cm) avec le traitement composite mycorhizé T5 et monospore T2 respectivement, contrairement au témoin absolu de la variété R3 ($9,78 \pm 0,84$ cm) qui a enregistré la plus faible hauteur à cette période. Les traitements mycorhiziens monospore (T2) et composite (T12) ont enregistré les hauteurs les plus élevées ($12,32 \pm 0,76$; $12,25 \pm 0,75$ cm) ; contrairement au traitement mycorhizé (T6) qui a enregistré la plus faible hauteur ($10,50 \pm 1,03$ cm) à cette période. Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré la hauteur la plus élevée ($11,81 \pm 1,05$ cm) par rapport à la variété R3 ($11,35 \pm 0,87$ cm). A 10 SAS un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,001$) et entre les variétés ($<0,001$). La variété R3 a enregistré les hauteurs les plus élevées ($35,4 \pm 1,63$ et $33,6 \pm 0,40$ cm) avec les traitements mycorhiziens monospore

(T1) et composite (T10) respectivement, contrairement au traitement au fongicide et témoin absolu de la variété TGX-1835-10 E qui ont enregistré les hauteurs les plus faibles ($24,67 \pm 1,68$ et $24,87 \pm 1,72$ respectivement). Les traitements mycorhiziens monospore (T1) et composites (T9 et T13) ont enregistré les hauteurs les plus élevées ($30,50 \pm 5,47$; $30,12 \pm 2,36$ et $30 \pm 2,57$ cm respectivement) ; contrairement au témoin absolu qui a enregistré la plus faible hauteur ($25,27 \pm 1,22$ cm). Néanmoins il est à noter qu'il n'existe pas de différence significative entre les traitements mycorhiziens. Concernant l'effet variété, la variété R3 a enregistré la hauteur la plus élevée ($30,92 \pm 2,53$ cm) par rapport à la variété TGX-1835-10 E ($26,49 \pm 2,03$ cm)

Tableau XXVIII. Effet des traitements sur la hauteur de la tige en fonction des variétés et des sites.

	Traitements	Bangangté			Mfou		
		6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
Variété TGX-1835-10 E (V1)	T0 ⁻	9,77 ± 1,06ab	16,97 ± 3,30bcde	20,73 ± 2,19 n	12,52 ± 0,44abcde	20,57 ± 0,66fghij	24,87 ± 1,72opq
	T0 ⁺	9,80 ± 1,01ab	16,93 ± 3,15bcde	20,67 ± 2,08 n	11,07 ± 0,70hijkl	20,60 ± 0,20fghi	24,67 ± 1,68pq
	T1	10,53 ± 1,41ab	19,93 ± 3,06abcde	24,80 ± 2,19ijklmn	10,45 ± 0,72lm	19,47 ± 0,55klm	25,6 ± 0,52mnopq
	T2	11,50 ± 1,37a	21,60 ± 2,35abcde	28 ± 2,60fghijk	12,89 ± 0,19ab	21,73 ± 0,55cde	27,53 ± 1,74ijklmn
	T3	8,73 ± 1,17ab	16,03 ± 2,60e	21,47 ± 2,83mn	12,13 ± 0,80bcdefgh	20,43 ± 0,51ghij	27,53 ± 1,61ijklmn
	T4	9,90 ± 1,60ab	18,87 ± 2,77abcde	23,37 ± 3,10klmn	12,14 ± 0,55abcdefgh	20,4 ± 0,43ghijk	24,37 ± 1,70pq
	T5	8,03 ± 1,05b	15,73 ± 2e	21,70 ± 2,89mn	13,22 ± 0,83a	20,17 ± 0,51hijkl	28,47 ± 2,21ghijk
	T6	11,03 ± 1,79ab	19,47 ± 4,56abcde	25,53 ± 3,44ijklmn	11,22 ± 0,63ghijkl	19,33 ± 0,57lm	27,07 ± 1,36jklmno
	T7	8,50 ± 2,06ab	16,40 ± 3,21cde	21 ± 3,27 mn	10,42 ± 0,52lm	18,63 ± 0,63m	23,60 ± 1,80q
	T8	9,37 ± 1,76ab	16,67 ± 3,64bcde	22,47 ± 3,57lmn	10,89 ± 0,53ijkl	20,87 ± 0,83defghi	25,33 ± 1,47nopq
	T9	8,50 ± 1,37ab	17,10 ± 2,55bcde	22,87 ± 2,74klmn	11,58 ± 0,52defghijk	21,07 ± 0,50cdefgh	28,20 ± 1,03hijkl
	T10	10,03 ± 2,29ab	18,47 ± 4,13abcde	24,10 ± 3,73jklmn	10,45 ± 0,88lm	21,20 ± 0,72cdefg	25,93 ± 1,44lmnop
	T11	10,83 ± 1,76ab	17,33 ± 3,30bcde	23,27 ± 3,52klmn	12,72 ± 0,50abc	20,97 ± 0,87cdefgh	27,67 ± 1,15hijklm
	T12	10,30 ± 1,35ab	19,97 ± 3,55abcde	25,30 ± 2,60ijklmn	12,67 ± 0,57abcd	21,8 ± 0,4cd	27 ± 1,74jklmno
	T13	9,67 ± 2,90ab	22,33 ± 2,89abcd	26,20 ± 3,32hijklm	12,28 ± 0,53abcdefg	21,87 ± 0,89c	28,07 ± 1,84hijkl
T14	9,13 ± 1,33ab	18,70 ± 2,70abcde	25,60 ± 2,42ijklmn	12,33 ± 0,57abcdef	21,4 ± 0,72cdef	28,03 ± 1,95hijkl	
	Moyenne V1	9,72 ± 1,67a	18,28 ± 3,25b	23,57 ± 3,24b	11,81 ± 1,05a	20,65 ± 1,03a	26,49 ± 2,03b
Variété R3 (V2)	T0 ⁺	10,47 ± 3,21ab	19,13 ± 5,59abcde	27,33 ± 4,42ghijkl	11,87 ± 0,80bcdefghij	20,47 ± 0,30fghij	26,6 ± 1,126klmnop
	T0 ⁻	10,50 ± 3,15ab	19,13 ± 5,59abcde	27,87 ± 5,37fghijk	9,78 ± 0,84m	20,53 ± 0,30fghij	25,67 ± 0,57mnopq
	T1	11,10 ± 3,29ab	21,90 ± 4,50abcde	34,90 ± 3,19abcd	11,40 ± 0,69fghijkl	23,23 ± 0,05a	35,4 ± 1,63a
	T2	11,60 ± 2,11a	23,53 ± 4,57a	35,33 ± 3,74abc	11,75 ± 0,66cdefghij	21,17 ± 0,20cdefg	29,73 ± 0,94efghi
	T3	8,97 ± 1,45ab	16,20 ± 3,41de	28,10 ± 2,25fghijk	11,72 ± 0,75cdefghij	20,80 ± 0,34efghi	30,73 ± 1,13cdefg
	T4	11,07 ± 1,36ab	21,27 ± 1,02abcde	32,93 ± 2,32abcdef	10,75 ± 0,66jklm	21,90 ± 0,26bc	31 ± 1,21cdef
	T5	8,70 ± 2,72ab	18,77 ± 2,63abcde	31,40 ± 3,67bcdefgh	10,50 ± 0,50klm	19,63 ± 0,63jkl	29,13 ± 1,52fghij
	T6	11,60 ± 1,80a	22,60 ± 4,59ab	36,83 ± 3,42a	11,79 ± 0,50cdefghij	20,13 ± 0,75hijkl	29,87 ± 0,70defgh
	T7	9,93 ± 2,68ab	18,37 ± 3,69abcde	31,67 ± 3,85abcdefg	11,44 ± 0,96efghijkl	21,63 ± 0,55cde	32,4 ± 1,21bc
	T8	10,13 ± 2,34ab	19 ± 4,50abcde	29,57 ± 3,09defghi	11,50 ± 0,86efghijkl	20 ± 0,62ijkl	31,47 ± 1,51bcde
	T9	8,93 ± 2,30ab	17,57 ± 4,10abcde	28,87 ± 3,55efghij	11,92 ± 0,52bcdefghi	20,80 ± 0,75efghi	32,03 ± 1,35bcd
	T10	9,67 ± 2,61ab	20,70 ± 5,40abcde	34,17 ± 3,92abcde	12,17 ± 0,76abcdefg	22,83 ± 0,30ab	33,6 ± 0,40ab
	T11	9,67 ± 2,08ab	18,47 ± 3,91abcde	30,07 ± 2,61cdefghi	10,87 ± 0,65ijkl	20,57 ± 0,89fghij	31,27 ± 0,70cdef
	T12	9,30 ± 1,93ab	19,20 ± 5,30abcde	31,57 ± 3,76abcdefgh	11,83 ± 0,76bcdefghij	20,5 ± 0,62fghij	32 ± 0,52bcde
	T13	10,47 ± 2,96ab	22,53 ± 4,79abc	36,20 ± 3,99ab	11,83 ± 0,72bcdefghij	20,80 ± 0,6efghi	31,93 ± 1,40bcde
T14	9,67 ± 2,32ab	18,97 ± 3,12abcde	32,17 ± 3,25abcdefg	10,51 ± 0,43klm	20,53 ± 0,56fghij	31,93 ± 1,52bcde	
	Moyenne V2	10,11 ± 2,22a	19,83 ± 4,09a	31,81 ± 4,21a	11,35 ± 0,87b	20,97 ± 1,05a	30,92 ± 2,53a
	Pr(>F)V	0,3749ns	0,04969*	<0,001***	0,0228*	0,145ns	<0,001***
	Pr(>F)T	0,4049ns	0,12091ns	<0,001***	0,034*	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	0,9998ns	0,99994ns	0,9469487ns	<0,001***	<0,001***	<0,001***

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P< 0,05

III.1.4.2.1.2. Diamètre au collet de la tige

Le diamètre au collet des différentes variétés en fonction des traitements, augmentait au cours du temps dans les deux sites (Tableau. XXX). Dans le site de Bangangté aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement, entre les traitements et entre les variétés à 6 SAS. Néanmoins on a noté une légère augmentation des diamètres de certains et traitements mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés. Les diamètres les plus élevés (4,51 et 4,27 mm) ont été obtenus chez la variété R3(V2) avec les traitements mycorhizés T6, T13, respectivement, contrairement aux témoins négatif et positif qui ont enregistré des diamètres de 3,78 mm chacun chez la même variété. Indépendamment des variétés, ces deux traitements (T6 et T13) sont ceux ayant présentés les plus gros diamètres ($4,14 \pm 0,77$ et $4,14 \pm 0,64$ mm), avec la plus faible valeur obtenue avec le traitement T8 ($3,55 \pm 0,32$ mm). A 10 SAS aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement et entre les traitements. Néanmoins, la variété R3 a enregistré les plus gros diamètres ($7,69 \pm 1,32$ et $7,16 \pm 1,03$ mm) avec le traitement composite mycorhizé (T13) et monospore (T1), contrairement à la TGX-1835-10 E qui a enregistré le plus petit diamètre ($5,03 \pm 0,65$ mm) avec le traitement mycorhizé monospore T3. Les traitements mycorhizés T13, T1, T6 et T14 ont enregistré les plus gros diamètres ($6,87 \pm 1,47$; $6,57 \pm 1,06$; $6,54 \pm 1,09$ et $6,47 \pm 0,69$ mm), contrairement au traitement mycorhizé T8 ($5,19 \pm 0,52$ mm). Seul un effet significatif a été observé entre les variétés ($<0,001$). La variété R3 (V2) a enregistré le diamètre le plus élevé ($6,47 \pm 1,10$) par rapport à la variété TGX-1835-10 E ($5,54 \pm 0,61$ mm).

A Mfou un effet non significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement et entre les traitements à 6 SAS. Néanmoins, tout comme à Bangangté, c'est la variété R3 qui a enregistré le plus gros diamètre ($4,97 \pm 0,45$ mm) avec le traitement mycorhizé T7 ; le plus faible diamètre ($3,90 \pm 0,98$ mm) étant obtenu chez la variété TGX-1835-10 E avec le traitement mycorhizé T3. Seul un effet significatif a été observé entre les variétés ($<0,001$) à cette période. La variété R3 (V2) a enregistré le plus gros diamètre ($4,50 \pm 0,60$ mm) par rapport à la TGX-1835-10 E ($4,16 \pm 0,57$ mm). A 10 SAS aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement, entre les traitements et entre les variétés. Cependant la variété R3 a enregistré le plus gros diamètre ($7,7 \pm 1,38$ mm) avec le traitement mycorhizé T7; les plus faibles diamètres ($5,70 \pm 0,34$; $5,8 \pm 0,36$ et T9 mm) étant obtenu chez la variété TGX-1835-10 E avec les traitements mycorhiziens composites T10, T11 et T9 respectivement. Les traitements mycorhizés monospores T4, T3 et composite T7 ont enregistré les plus gros diamètres ($7,22 \pm 1,30$; $7,20 \pm 1,01$ et $7,13 \pm 1,30$ mm respectivement) par rapport aux traitements mycorhizés composites T11 et T10 ($5,82 \pm 0,68$ et $5,83 \pm 0,38$ mm respectivement).

Tableau XXIX. Effet des traitements sur le diamètre au collet en fonction des variétés et des sites.

	Bangangté			Mfou			
	Traitements	6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
Variété TGX1835-10E (V1)	T0 ⁻	3,9 ± 0,36abc	4,21 ± 0,23e	5,38 ± 0,41efg	4,03 ± 0,71ab	5,63 ± 0,63abc	5,97 ± 1,44ab
	T0 ⁺	3,71 ± 0,27abc	4,33 ± 0,69de	5,45 ± 0,28efg	4,07 ± 0,66ab	5,57 ± 0,80abc	5,97 ± 1,20ab
	T1	4,03 ± 0,16abc	4,84 ± 0,47abcde	5,97 ± 0,83bcdefg	4,05 ± 0,408ab	5,73 ± 0,55abc	6,2 ± 1,24ab
	T2	4,10 ± 0,43abc	4,93 ± 0,71abcde	5,69 ± 0,38cdefg	4,77 ± 0,11ab	6,43 ± 0,66abc	6,93 ± 0,70ab
	T3	3,57 ± 0,58bc	4,6 ± 0,67cde	5,03 ± 0,65g	3,90 ± 0,98b	5,97 ± 0,65abc	6,70 ± 0,95ab
	T4	3,7 ± 0,47abc	4,55 ± 0,38cde	5,32 ± 0,38fg	4,39 ± 0,81ab	6,23 ± 0,68abc	7,27 ± 1,98ab
	T5	3,57 ± 0,28bc	4,42 ± 0,37cde	5,13 ± 0,69g	4,23 ± 0,66ab	5,80 ± 0,70abc	6,5 ± 1,67ab
	T6	3,77 ± 0,47abc	4,78 ± 0,35abcde	5,99 ± 0,29bcdefg	4,02 ± 0,92ab	5,37 ± 0,61bc	6 ± 0,78ab
	T7	3,63 ± 0,49bc	4,57 ± 0,54cde	5,29 ± 0,68fg	4,15 ± 0,76ab	5,67 ± 0,95abc	6,57 ± 1,16ab
	T8	3,75 ± 0,32abc	4,64 ± 0,74bcde	5,22 ± 0,71fg	4,22 ± 0,38ab	5,77 ± 0,66abc	6,43 ± 1,18ab
	T9	3,95 ± 0,15abc	4,65 ± 0,42bcde	5,63 ± 0,44defg	4 ± 0,36ab	5,60 ± 0,55abc	5,8 ± 0,95b
	T10	3,73 ± 0,41abc	4,92 ± 1,20abcde	5,84 ± 0,99bcdefg	3,93 ± 0,568ab	5,33 ± 0,72bc	5,70 ± 0,34b
	T11	3,45 ± 0,21bc	4,42 ± 0,26cde	5,17 ± 0,09g	4,03 ± 0,55ab	5,27 ± 0,80c	5,8 ± 0,36b
	T12	3,72 ± 0,12abc	4,75 ± 0,18abcde	5,55 ± 0,30efg	4,23 ± 0,77ab	5,53 ± 0,61abc	6,5 ± 0,79ab
	T13	4,01 ± 0,64abc	5,28 ± 1,07abcde	6,04 ± 1,28bcdefg	4,22 ± 0,46ab	5,60 ± 0,46abc	6,4 ± 1,10ab
T14	3,99 ± 0,2abc	4,91 ± 0,35abcde	5,93 ± 0,35bcdefg	4,3 ± 0,62ab	5,63 ± 0,98abc	6,27 ± 1,04ab	
Moyenne V1	3,78 ± 0,36a	4,67 ± 0,57b	5,54 ± 0,61b	4,16 ± 0,57b	5,69 ± 0,65a	6,31 ± 1,03a	
Variété R3(V2)	T0 ⁻	3,78 ± 0,51abc	4,9 ± 0,55abcde	6,18 ± 1,53bcdefg	4,53 ± 0,907ab	5,90 ± 0,86abc	6,4 ± 0,72ab
	T0 ⁺	3,78 ± 0,51abc	4,87 ± 0,61abcde	6,18 ± 1,53bcdefg	4,47 ± 0,80ab	5,70 ± 0,78abc	6,33 ± 0,61ab
	T1	3,9 ± 0,36abc	5,87 ± 0,64a	7,16 ± 1,03ab	4,9 ± 0,43ab	6,03 ± 0,95abc	6,87 ± 1,15ab
	T2	4,13 ± 0,83abc	5,46 ± 0,35abcd	6,43 ± 0,69abcdefg	4,90 ± 0,26ab	6,57 ± 0,85a	7,10 ± 0,62ab
	T3	3,67 ± 0,23bc	4,93 ± 0,4abcde	6,10 ± 1,38bcdefg	4,92 ± 0,42ab	6,20 ± 0,75abc	7,70 ± 0,95a
	T4	4,17 ± 0,80abc	5,55 ± 0,91abc	7,10 ± 0,91abc	4,97 ± 0,45a	6,20 ± 0,81abc	7,17 ± 0,57ab
	T5	3,83 ± 0,58abc	5,21 ± 0,69abcde	6,65 ± 1,16abcdef	4,10 ± 0,98ab	5,4 ± 0,52abc	6,6 ± 2,08ab
	T6	4,51 ± 0,63a	5,5 ± 0,93abc	7,08 ± 1,42abcd	4,40 ± 0,69ab	5,53 ± 0,76abc	6,2 ± 0,87ab
	T7	3,89 ± 0,36abc	5,11 ± 0,96abcde	6,81 ± 0,98abcde	4,97 ± 0,70a	6,47 ± 0,61ab	7,7 ± 1,38a
	T8	3,35 ± 0,21c	4,27 ± 0,39e	5,17 ± 0,43g	4,2 ± 0,87ab	6,27 ± 0,64abc	7,07 ± 2,28ab
	T9	3,71 ± 0,79abc	4,97 ± 1abcde	6,13 ± 0,76bcdefg	4,43 ± 0,45ab	6,37 ± 0,56abc	7,29 ± 1,92ab
	T10	3,87 ± 1,05abc	4,81 ± 1,35abcde	5,88 ± 1,55bcdefg	4,33 ± 0,55ab	5,63 ± 0,4abc	5,97 ± 0,45ab
	T11	3,82 ± 0,61abc	4,70 ± 0,62bcde	6,15 ± 0,84bcdefg	4,33 ± 0,40ab	5,33 ± 0,98bc	5,83 ± 1,02ab
	T12	3,44 ± 0,80abc	4,89 ± 0,65abcde	5,94 ± 0,59bcdefg	4,47 ± 0,46ab	6,17 ± 0,64abc	6,67 ± 0,76ab
	T13	4,27 ± 1,02ab	5,79 ± 1,14ab	7,69 ± 1,32a	4,17 ± 0,15ab	5,40 ± 0,53abc	6,23 ± 0,21ab
T14	3,62 ± 0,05bc	5,01 ± 0,70abcde	7,02 ± 0,43abcd	4 ± 0,62ab	5,73 ± 0,90abc	6,43 ± 1,01ab	
Moyenne V2	3,85 ± 0,61a	5,11 ± 0,77a	6,47 ± 1,10a	4,50 ± 0,60a	5,93 ± 0,73a	6,72 ± 1,13a	
Pr(>F)V	0,4458ns	0,00611**	<0,001***	0,009525**	0,1162ns	0,08976ns	
Pr(>F)T	0,7353ns	0,44624ns	0,2251ns	0,832935ns	0,3101ns	0,55546ns	
Pr(>F)V*T	0,8855ns	0,94815ns	0,8697ns	0,931422ns	0,9938ns	0,99830ns	

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P<0,05

III.1.4.2.1.3. Nombre de feuilles

Le nombre de feuilles obtenu pendant les différentes prises augmentait en fonction des variétés et traitements au cours du temps dans les sites d'étude (Tableau XXXI). A 6 SAS dans le site de Bangangté, un effet non significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement, entre les traitements et entre les variétés. Néanmoins à cette période la variété R3 a enregistré le nombre de feuilles le plus élevé ($3,47 \pm 0,41$) avec le traitement mycorhizé composite T13 et le plus faible ($2,87 \pm 0,70$) avec les traitements mycorhizés composites T10, T12 et chez la variété TGX-1835-10 E avec le traitement mycorhizé monospore T3. Indépendamment des variétés, le traitement T13 a enregistré le nombre de feuilles le plus élevé ($3,43 \pm 0,42$), contrairement aux traitements mycorhizés T3, T12, T10, T5 ($2,97 \pm 0,15$; $3 \pm 0,17$; $3 \pm 0,48$ et $3,03 \pm 0,37$ respectivement). A 10 SAS, aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement et entre les variétés. Néanmoins, la variété R3 a enregistré le nombre de feuilles le plus élevé ($23,53 \pm 2,41$) avec le traitement T13 et le plus faible ($15,4 \pm 2,6$) avec le témoin absolu de la même variété. Seul un effet significatif a été observé entre les traitements à cette période. Les traitements mycorhiziens T13, T6 et T2 ont enregistré les nombres de feuilles les plus élevés ($22,57 \pm 2,97$; $21,87 \pm 2,76$ et $21,83 \pm 2,93$ respectivement), contrairement au témoin absolu ($16,40 \pm 2,73$) et traitement au fongicide ($16,50 \pm 2,73$).

Tout comme dans le site de Bangangté, un effet non significatif a été observé à Mfou à 6 SAS entre l'interaction variété x traitement, entre les traitements et entre les variétés. Néanmoins la variété R3 a enregistré le nombre de feuilles le plus élevée ($3,47 \pm 0,41$) avec le traitement composite mycorhizien T7 et le plus faible ($2,6 \pm 0,52$) chez la même variété avec le traitement composite mycorhizien T11. Le traitement mycorhizé T1 a enregistré le nombre de feuilles le plus élevé ($3,40 \pm 0,17$), contrairement au traitement composite mycorhizien T11 ($2,93 \pm 0,57$) à cette période. A 10 SAS un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,001$) et entre les variétés ($<0,001$). La variété TGX-1835-10 E a enregistré le nombre de feuilles le plus élevé ($27,6 \pm 0,91$) avec le traitement composite mycorhizien, suivi de $26,47 \pm 0,80$ chez la variété R3 avec le traitement monospore mycorhizien T3, et de $26,47 \pm 0,80$ chez la variété TGX-1835-10 E avec le traitement monospore T2 ; contrairement au témoin absolu de la variété R3 ($18,47 \pm 0,75$). Les traitements mycorhiziens T2, T5 et T3 ont enregistré les nombres de feuilles les plus élevés ($24,37 \pm 2,39$; $24,10 \pm 3,91$ et $24 \pm 2,87$ respectivement), contrairement au témoin absolu T0 ($19,07 \pm 0,94$). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré le nombre de feuilles le plus élevé ($23,03 \pm 2,40$) par rapport à R3 ($21,41 \pm 1,91$).

Tableau XXXI. Effet des traitements sur le nombre de feuilles en fonction des variétés et des sites.

	Traitements	Bangangté			Mfou		
		6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
Variété TGX-1835-E (V1)	T0 ⁻	3,07 ± 0,11abc	7,87 ± 1,2ab	17,4 ± 2,98cdefg	3,27 ± 0,23abc	11,2 ± 0,91abc	19,67 ± 0,76nop
	T0 ⁺	3,07 ± 0,11abc	7,87 ± 1,2ab	17,4 ± 2,98cdefg	3,26 ± 0,23abc	8,2 ± 0,80k	19,6 ± 0,87nop
	T1	3,47 ± 0,11a	8,53 ± 1,28ab	20,67 ± 2,08abcdefg	3,4 ± 0,20ab	9,33 ± 0,61efghijk	22,47 ± 0,80ghi
	T2	3,33 ± 0,30abc	8,4 ± 2,4ab	22,53 ± 3,75abc	3,20 ± 0,2abcd	11,53 ± 0,75ab	26,47 ± 0,80ab
	T3	2,87 ± 0,11c	6,47 ± 1,50b	19 ± 2,42abcdefg	2,87 ± 0,41abcd	10,13 ± 0,64cdef	21,47 ± 0,98ijkl
	T4	2,93 ± 0,11bc	7,67 ± 1,15ab	18,67 ± 3abcdefg	3,07 ± 0,30abcd	10,67 ± 0,57abcd	25,13 ± 0,80cd
	T5	3 ± 0,5abc	6,93 ± 1,67ab	18,07 ± 2,66abcdefg	3,33 ± 0,41abc	11,47 ± 0,75ab	27,6 ± 0,91a
	T6	3,07 ± 0,11abc	7,93 ± 1,44ab	21,8 ± 2,30abc	2,8 ± 0,4bcd	8,87 ± 0,83fghijk	21,6 ± 0,72hijkl
	T7	3 ± 0,2abc	7,6 ± 1,38ab	19,8 ± 2,77abcdefg	3,07 ± 0,46abcd	11,67 ± 0,81a	24 ± 0,87def
	T8	3,20 ± 0,34abc	8,07 ± 1,72ab	19,73 ± 4,08abcdefg	3,27 ± 0,3abc	10,67 ± 0,61abcd	24,53 ± 0,92de
	T9	3,07 ± 0,31abc	7,47 ± 1,26ab	18,93 ± 2,53abcdefg	3,33 ± 0,41abc	10,33 ± 0,94bcde	21,53 ± 0,70hijkl
	T10	3,13 ± 0,23abc	8,33 ± 1,79ab	21,07 ± 2,94abcdef	3,13 ± 0,11abcd	9,93 ± 0,9cdefg	21,27 ± 0,80ijkl
	T11	3,07 ± 0,11abc	7,53 ± 1,37ab	18,53 ± 2,33abcdefg	3,27 ± 0,46abc	10,73 ± 0,94abcd	21,93 ± 0,94hijk
	T12	3,13 ± 0,11abc	8 ± 1,4ab	20,6 ± 2,35abcdefg	3,07 ± 0,50abcd	9,67 ± 0,75defghi	25,87 ± 0,61bc
	T13	3,4 ± 0,52ab	7,67 ± 1,72ab	21,6 ± 3,67abcd	3,13 ± 0,30abcd	10,27 ± 0,64bcde	22,80 ± 0,91fgh
T14	3,33 ± 0,23abc	8,07 ± 1,96ab	21 ± 3,02abcdef	3,27 ± 0,46abc	9,33 ± 0,8efghijk	22,53 ± 0,50ghi	
	Moyenne V1	3,13 ± 0,27a	7,78 ± 1,39a	19,80 ± 2,87a	3,17 ± 0,33a	10,25 ± 1,16a	23,03 ± 2,40a
Variété R3 (V2)	T0 ⁻	3,27 ± 0,30abc	6,93 ± 1,47ab	15,4 ± 2,6g	3,4 ± 0,34ab	9,27 ± 0,94efghijk	18,47 ± 0,75p
	T0 ⁺	3,27 ± 0,30abc	7,07 ± 1,7ab	15,6 ± 2,7fg	3,47 ± 0,30a	9,2 ± 0,87efghijk	18,87 ± 0,61op
	T1	3,07 ± 0,11abc	8,6 ± 1,31ab	21,27 ± 4,87abcde	3,4 ± 0,2ab	9,6 ± 0,60defghij	22,07 ± 0,83hijk
	T2	3,20 ± 0,20abc	8,6 ± 1,9ab	21,13 ± 2,44abcde	3,13 ± 0,11abcd	9,87 ± 0,8defgh	22,27 ± 0,64ghij
	T3	3,07 ± 0,11abc	6,8 ± 2,16ab	16,27 ± 4,72defg	3,13 ± 0,11abcd	9,07 ± 0,83efghijk	26,53 ± 0,64ab
	T4	3,2 ± 0,00abc	9,2 ± 2,11a	22,93 ± 4,1ab	3,2 ± 0,4abcd	9,73 ± 0,70defghi	20,80 ± 0,62klmn
	T5	3,07 ± 0,30abc	7,3 ± 1,3ab	17,8 ± 5,1bcdefg	3,07 ± 0,11abcd	8,33 ± 0,75jk	20,60 ± 0,85lmn
	T6	3,4 ± 0,4ab	9,07 ± 1,92ab	21,93 ± 3,71abc	3,33 ± 0,23abc	8,87 ± 0,81fghijk	21,13 ± 0,75jklm
	T7	3,27 ± 0,46abc	7 ± 1ab	18,13 ± 4,46abcdefg	3,47 ± 0,41a	10,80 ± 0,91abcd	23,53 ± 0,57efg
	T8	3,07 ± 0,30abc	6,8 ± 1,05ab	16 ± 5,37efg	2,73 ± 0,5cd	10 ± 0,80cdefg	19,87 ± 0,80mno
	T9	3,07 ± 0,5abc	6,53 ± 1,28ab	16,27 ± 3,41defg	3,33 ± 0,57abc	10,27 ± 0,80bcde	22,07 ± 0,90hijk
	T10	2,87 ± 0,70c	7,13 ± 2,71ab	19,27 ± 3,25abcdefg	3,13 ± 0,30abcd	8,73 ± 0,68ghijk	21,47 ± 0,80ijkl
	T11	3,07 ± 0,30abc	6,67 ± 1,02ab	16,07 ± 3,36efg	2,6 ± 0,52d	9,27 ± 0,8efghijk	21,07 ± 0,90jklm
	T12	2,87 ± 0,11c	6,87 ± 1ab	17,73 ± 2,9bcdefg	3,27 ± 0,30abc	9,13 ± 0,61efghijk	21,47 ± 0,98ijkl
	T13	3,47 ± 0,41a	9,2 ± 2,74a	23,53 ± 2,41a	3,2 ± 0,2abcd	8,53 ± 0,50ijk	21,27 ± 0,64ijkl
T14	3,07 ± 0,11abc	6,6 ± 1ab	17,13 ± 2,57cdefg	2,93 ± 0,80abcd	8,6 ± 0,87hijk	21,13 ± 0,80jklm	
	Moyenne V2	3,14 ± 0,32a	7,53 ± 1,72a	18,53 ± 4,12a	3,18 ± 0,40a	9,33 ± 0,92b	21,41 ± 1,91b
	Pr(>F)V	0,9448ns	0,5568ns	0,08993ns	0,9567ns	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)T	0,4967ns	0,6302ns	0,03002*	0,6516ns	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)V*T	0,5887ns	0,8651ns	0,81092ns	0,3680ns	0,00847**	<0,001***

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P< 0.05

III.1.4.2.2. Effets des traitements sur les paramètres épidémiologiques en champ

III.1.4.2.2.1. Incidence de la maladie

L'incidence de la maladie obtenue pendant les différentes périodes de prises de données augmentait en fonction des variétés et traitements dans les deux sites (Tableau.XXXII). A Bangangté, des effets significatifs ont été observés entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,001$) et entre les variétés ($<0,001$) à 6 SAS. La variété TGX-1835-10 E a enregistré la plus faible incidence (5,55 %) avec les traitements mycorhiziens monospore (T3) et composites (T8, T11 et T14 respectivement), et les plus élevées (13,77; 12,91 et 12,97 %) avec le traitement mycorhizé T1, le témoin absolu (T0⁻) et le traitement au fongicide (T0⁺) respectivement. Le traitement mycorhizien monospore T3 a enregistré la plus faible incidence (11,11 %) par rapport au traitement mycorhizien T4 et fongicide qui ont enregistré l'incidence la plus élevée (21,29 %). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré l'incidence la plus faible (9,31 %) par rapport à la variété R3 (23,26 %) à cette période. A 10 SAS des effets significatifs ont été également observés entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,001$) et entre les variétés ($<0,001$). La variété TGX-1835-10 E a enregistré la plus faible incidence (14,81 %) avec les traitements mycorhiziens monospore (T3), composites (T7, T8) et la plus élevée (100 %) avec le témoin absolu chez la variété R3. Le traitement mycorhizé T3 a enregistré la plus faible incidence (15,74 %) par rapport au témoin absolu (52,77 %). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré l'incidence la plus faible (24,19 %) par rapport à la variété R3 (43,63 %).

A Mfou un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,001$) à 6 SAS. La variété TGX-1835-10 E a enregistré des faibles incidences (22,22; 25,66; 25,93 et 25,96 %) avec les traitements mycorhizés monospores (T2, T3), composites (T10, T4) respectivement et la plus élevée (64,81 %) avec le traitement mycorhizé T11 chez la même variété. Les traitements mycorhizés T4, T3, T2 et T13 ont enregistré les plus faibles incidences (24,09 ; 27,64 ; 27,77 et 27,77 % respectivement) contrairement au traitement mycorhizien T11 (53,70 %) et témoin absolu (52,77 %). Concernant l'effet variété il n'existe pas d'effet significatif entre les variétés à cette période. A 10 SAS, un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,001$) et entre les variétés ($<0,001$).

A 10 SAS la variété TGX-1835-10E a enregistré des faibles incidences (75,59; 75,92 et 79,63 %) avec les traitements mycorhizés (T3, T14 et le témoin positif T0⁺) et la plus élevée (100 %) ayant été obtenu chez la variété R3 (V2) avec tous les traitements. Le

traitement mycorhizé T14 et le traitement au fongicide ont enregistré les plus faibles incidences (87,96 et 89,81 % respectivement), contrairement au témoin absolu (99,07 %). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10E a enregistré l'incidence la plus faible (89,23 %) par rapport à la R3 (100 %).

Tableau XXXI. Effet des traitements sur l'incidence (%) de la maladie en fonction des variétés et sites au cours du temps.

	Traitements	Bangangté			Mfou		
		6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
Variété TGX - 1835-10 E(V1)	T0 ⁻	12,96 ± 3,39fghi	42,59 ± 4,20bc	55,55 ± 4,55c	51,85 ± 0,94c	83,33 ± 5,55b	98,15 ± 3,2ab
	T0 ⁺	12,97 ± 3,11fghi	27,78 ± 3,66efghi	40,74 ± 4,20efgh	44,45 ± 0,61e	51,85 ± 2,42g	79,63 ± 5,57fg
	T1	13,77 ± 2,56fgh	22,74 ± 3,77hijk	33,33 ± 3,59hij	29,63 ± 0,72j	50 ± 2,33gh	88,89 ± 6,11cde
	T2	12,96 ± 2,47fghi	22,22 ± 3,66hijkl	31,48 ± 3,56ij	22,22 ± 0,48l	46,29 ± 3,78hi	94,44 ± 5,55abc
	T3	5,55 ± 1,55j	12,97 ± 2,14mn	14,81 ± 3,11l	25,66 ± 0,49k	51,85 ± 4,61g	75,59 ± 6,41g
	T4	12,96 ± 3,90fghi	20,37 ± 3,30ijklm	20,37 ± 2,83kl	25,96 ± 0,64k	79,63 ± 4,45b	90,74 ± 6,41cde
	T5	9,26 ± 1,99hij	18,52 ± 2,83klm	22,22 ± 3,55kl	55,55 ± 0,87b	64,82 ± 4,2d	88,89 ± 5,29cde
	T6	7,41 ± 1,54ij	12,96 ± 1,48mn	22,22 ± 3,65 kl	37,04 ± 0,91g	57,41 ± 3,01ef	90,74 ± 6,41cde
	T7	9,26 ± 2,83hij	14,82 ± 2,47lmn	14,82 ± 2,7l	48,15 ± 0,89d	59,26 ± 3,32e	90,74 ± 5,57cde
	T8	5,55 ± 1,55j	12,96 ± 2,47mn	14,82 ± 3,93l	44,44 ± 0,78e	61,11 ± 4,69de	92,59 ± 3,20bcd
	T9	7,41 ± 1,64ij	18,52 ± 3,46klm	22,22 ± 3,11 kl	37,04 ± 0,50g	51,85 ± 2,75g	94,44 ± 5,55abc
	T10	9,26 ± 1,97hij	14,81 ± 3,08lmn	18,52 ± 4,78l	25,93 ± 0,65k	44,45 ± 3,86i	90,74 ± 6,41cde
	T11	5,55 ± 1,44j	14,81 ± 3,11lmn	16,67 ± 5,55l	64,81 ± 0,73a	70,36 ± 5,78c	87,04 ± 4,20de
	T12	7,41 ± 3,20ij	18,52 ± 3,20klm	20,37 ± 4,78kl	40,74 ± 0,83f	59,59 ± 2,15e	87,03 ± 5,52de
	T13	11,11 ± 1,11ghij	14,82 ± 3,39lmn	18,52 ± 5,57l	33,33 ± 0,95hi	53,71 ± 2,64fg	85,19 ± 3,61ef
T14	5,56 ± 1,89j	9,26 ± 2,46n	20,37 ± 5,14kl	34,52 ± 0,50gh	50,85 ± 2,17g	75,92 ± 4,29g	
	Moyenne V1	9,31 ± 3,62b	18,67 ± 8,13b	24,19 ± 11,34b	38,83 ± 11,86a	58,52 ± 11,40b	89,23 ± 6,98b
Variété R3 (V2)	T0 ⁻	27,78 ± 5,55ab	62,96 ± 6,42a	100a	53,70 ± 3,42bc	100a	100a
	T0 ⁺	29,63 ± 3,20ab	44,44 ± 5,55b	64,82 ± 8,48b	53,71 ± 3,46bc	100a	100a
	T1	14,82 ± 5,56efgh	22,22 ± 2,55hijkl	46,29 ± 4,62de	40,74 ± 2,16f	100a	100a
	T2	25,93 ± 3,20bc	29,63 ± 4,62efgh	42,59 ± 6,90efg	33,33 ± 1,50hi	100a	100a
	T3	16,67 ± 5,55efg	18,52 ± 4,57ijklm	27,78 ± 5,55 jk	29,63 ± 1,84j	100a	100a
	T4	29,63 ± 6,41ab	24,07 ± 5,17ghijk	27,78 ± 5,11jk	22,22 ± 2,43l	100a	100a
	T5	16,67 ± 3,25efg	20,37 ± 3,20klmn	27,77 ± 6,18jk	22,22 ± 2,22l	100a	100a
	T6	25,93 ± 3,20bc	38,89 ± 8,40bcd	44,45 ± 6,85def	42,59 ± 2,58ef	100a	100a
	T7	20,37 ± 4,20cde	31,48 ± 8,48defg	51,85 ± 6,90cd	33,33 ± 1,38hi	100a	100a
	T8	18,52 ± 3,70def	25,93 ± 7,38fghij	37,04 ± 5,94fghi	35,18 ± 1,63gh	100a	100a
	T9	18,52 ± 4,78def	25,93 ± 3,20fghij	42,59 ± 7,39efg	31,48 ± 1,14ij	100a	100a
	T10	20,37 ± 3,70cde	33,33 ± 5,55def	37,04 ± 6,41fghi	37,04 ± 2,08g	100a	100a
	T11	33,33 ± 5,55a	35,19 ± 7,35cde	37,04 ± 4,65fghi	42,59 ± 2ef	100a	100a
	T12	24,07 ± 6,41bcd	25,93 ± 4,46fghij	33,33 ± 5,11hij	42,59 ± 1,57ef	100a	100a
	T13	25,93 ± 5,06bc	38,89 ± 5,55bcd	42,59 ± 8,48efg	22,22 ± 1,55l	100a	100a
T14	20,37 ± 4,10cde	29,63 ± 3,20efgh	35,19 ± 8,48ghij	33,33 ± 1,55hi	100a	100a	
	Moyenne V2	23,26 ± 6,47a	31,48 ± 11,99a	43,63 ± 18,22a	35,99 ± 9,72a	100a	100a
	Pr(>F)V	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,203ns	<0,001***	<0,001***
	Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,989ns	<0,001***
	Pr(>F)V*T	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P<0,05

III.1.4.2.2.2. Sévérité de la maladie

La sévérité de la maladie obtenue pendant les différentes périodes de prises de données variait significativement entre les variétés et les traitements dans les deux sites. Pour les deux variétés, les traitements mycorhizés et traitement fongicide ont présenté une sévérité moindre par rapport au témoin négatif à ces différentes périodes (Tableau XXXIII). A 6 SAS dans le site de Bangangté, un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$) et entre les traitements ($<0,001$). La variété TGX-1835-10 E a enregistré les plus faibles sévérités (1,72 ; 2,07 et 2,33 %) avec les traitements mycorhizés composites (T10, T5), et monospore (T3), contrairement au témoin absolu de la variété R3 (13,25 %). Les traitements mycorhizés T10 et T5 ont enregistré respectivement les sévérités les plus faibles (3,26 et 3,28 %), contrairement au témoin absolu T0⁻ (7,06 %). En ce qui concerne l'effet variété, il n'existe pas d'effet significatif à cette période. A 10 SAS, aucun effet significatif n'a été observé entre l'interaction variété x traitement. Néanmoins la variété TGX-1835 -10 E a enregistré des faibles sévérités (5,93%; 6 % et 6,45 %) avec les traitements mycorhizés (T13, T3 et T6 respectivement) et la plus élevée (32,31 %) obtenue avec le témoin absolu chez la variété R3. A cette période, l'effet significatif a été observé entre les traitements ($<0,001$) et les variétés ($<0,001$). Les traitements composites mycorhizés T14, T13 et T6 ont enregistré les plus faibles sévérités (7,03; 7,06 et 7,39 %), contrairement au témoin absolu (18,56 %). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré la sévérité la plus faible (8,78 %) par rapport à la variété R3 (11,24 %).

Dans le site de Mfou, un effet non significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement et entre les traitements à 6 SAS. Néanmoins la variété TGX-1835-10 E a enregistré la plus faible sévérité (1,69 %) avec le traitement composite mycorhizien T11, et la plus élevée (5,71 %) avec le témoin absolu de la variété R3. L'effet significatif a été observé entre les variétés ($<0,001$) à cette période. A 10 SAS un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$), entre les traitements ($<0,001$) et entre les variétés ($<0,001$). La variété TGX-1835-10 E a enregistré des faibles sévérités (2,81; 2,84 ; 3,20 et 3,31 %) avec les traitements mycorhizés (T13, T3 T14 et T6 respectivement) et la plus élevée (58,86 %) avec le témoin négatif (T0⁻) de la variété R3. Les traitements mycorhizés T3, T13 et T6 ont enregistré des faibles sévérités (4,21 ; 4,29 et 4,37 %), contrairement au traitement témoins T0⁻(39,40 %). Concernant l'effet variété, la variété TGX-1835-10 E a enregistré la plus faible sévérité (4,89 %) par rapport à la variété R3 (10,30 %). Ainsi la variété TGX-1835-10 E est meilleure par rapport à la variété R3 pour ce paramètre. Les traitements composites mycorhizés T13 et T6 s'avèrent les mieux adaptés dans les deux sites.

Tableau XXXII. Effet des traitements sur la sévérité (%) de la maladie en fonction des variétés et des sites au cours du temps.

	Traitements	Bangangté			Mfou		
		6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
Variété TGX-1835-10 E (V1)	T0 ⁻	8,25±3,03b	13,11 ± 3,52b	20,80 ± 6,36b	3,68 ± 1,37abc	10,37 ± 2,86b	19,94 ± 5,92b
	T0 ⁺	6,11± 2,47bcde	9,72 ± 3,38bcdef	10,03 ± 4,80cde	2,97 ± 1,59abc	3,52 ± 1,08d	6,85 ± 2,25cd
	T1	5,67 ± 2,08bcdef	8,43 ± 2,89bcdef	9,10 ± 3,99cde	2,55 ± 1,6abc	3,31 ± 0,52d	4,40 ± 1,55d
	T2	4,16 ± 1,25bcdef	6,99 ± 2,24cdef	8,53 ± 3,20cde	2,66 ± 1,25abc	2,68 ± 1,93d	3,55 ± 1,03d
	T3	2,33 ± 1,26def	5,50 ± 1,50ef	6 ± 2e	2,32 ± 1,28bc	2,57 ± 1,42d	2,84 ± 0,28d
	T4	4,50 ± 2,29bcdef	9,03 ± 3,17bcdef	9,33 ± 4,80cde	3,50 ± 1,50abc	3,68 ± 0,94d	3,97 ± 1,22d
	T5	2,07 ± 1,67ef	8,03 ± 3,95bcdef	9,97 ± 2,45cde	2,27 ± 1,21abc	3,13 ± 0,93d	4,25 ± 0,97d
	T6	4 ± 1,75cdef	6,25 ± 3,07cdef	6,45 ± 2,78de	2,93 ± 1,53abc	2,87 ± 0,64d	3,31 ± 0,92d
	T7	4,17 ± 1,76bcdef	6,89 ± 2,89cdef	7,11 ± 2decde	2,54 ± 0,83abc	3,13 ± 0,74d	3,31 ± 0,78d
	T8	4,83 ± 2,36bcdef	6,33 ± 2,51cdef	7,53 ± 3,50de	3,27 ± 1,93abc	4,20 ± 1,18d	4,53 ± 0,91d
	T9	2,92 ± 1,87def	7,49 ± 2,20cdef	9,19 ± 4,75cde	3,36 ± 0,92abc	3,77 ± 1,22d	4,07 ± 1,35d
	T10	1,72 ± 0,85f	5,75 ± 2,46def	8,17 ± 3,64cde	2,79 ± 1,50abc	2,88 ± 1,27d	3,85 ± 1,35d
	T11	4,16 ± 1,76bcdef	6,50 ± 2,78cdef	8,08 ± 3,26cde	1,69 ± 0,12c	3,29 ± 0,64d	3,67 ± 0,44d
	T12	5,83 ± 2,25bcdef	6,49 ± 2,21cdef	7,78 ± 2,54cde	2,72 ± 0,52abc	3,16 ± 1,15d	3,17 ± 1,81d
	T13	4,75 ± 2,04bcdef	5,78 ± 2,03def	5,93 ± 2,61e	2,35 ± 1,13abc	2,66 ± 2,08d	2,81 ± 0,96d
T14	2,77 ± 2,26def	4,83 ± 2,25f	6,69 ± 2,12de	3,16 ± 0,13abc	3,95 ± 0,64d	3,20 ± 0,89d	
	Moyenne V1	4,37 ± 1,80a	7,43 ± 2,52b	8,78 ± 3,20b	2,82 ± 1,18b	3,70 ± 1,11b	4,89 ± 1,38b
Variété R3 (V2)	T0 ⁻	13,25 ± 5,95a	18,80 ± 6,29a	32,31 ± 7,33a	5,71 ± 2,52a	26,29 ± 8,96a	58,86 ± 12,17a
	T0 ⁺	7,24 ± 2,75bc	10,98 ± 3,89bcde	12,65 ± 5,50cde	2,38 ± 0,54abc	5,38 ± 2,11cd	7,12 ± 3,34cd
	T1	5,50 ± 3,50bcdef	11 ± 2,69bcde	12,62 ± 5,04cde	4,61 ± 2,59abc	9,46 ± 3,63bc	11,64 ± 4,83c
	T2	5,58 ± 1,90bcdef	9,50 ± 3,77bcdef	11,69 ± 4,91cde	4,09 ± 1abc	6,22 ± 2,55bcd	7,33 ± 3,84cd
	T3	4 ± 2,64cdef	7,41 ± 4,12cdef	9,33 ± 3,51cde	4,46 ± 1,08abc	4,98 ± 1,61	5,57 ± 2,05cd
	T4	4,81 ± 3,17bcdef	11 ± 4,76bcde	14,57 ± 5,16bc	3,89 ± 1,10abc	6,05 ± 2,79bcd	7,92 ± 3,26cd
	T5	5,50 ± 3,50bcdef	10,72 ± 3,52bcde	13,15 ± 4,81cd	4,95 ± 1,69abc	5,18 ± 2,21cd	5,55 ± 2,43cd
	T6	4,67 ± 2,89bcdef	8 ± 3,77bcdef	8,66 ± 4,42cde	4,27 ± 1,36abc	5 ± 2,50d	5,43 ± 2,23cd
	T7	4,56 ± 2,87bcdef	10,38 ± 4,84bcde	10,15 ± 3,92cde	5,03 ± 2,77abc	6,61 ± 2,90bcd	7,73 ± 3,12cd
	T8	4,60 ± 1,17bcdef	11,74 ± 3,80bc	11,62 ± 4,63cde	4,53 ± 1,46abc	5,75 ± 2,19cd	6,76 ± 2,75cd
	T9	6,33 ± 3,68bcd	11,17 ± 3,93bcd	11,98 ± 4,05cde	3,62 ± 1,92abc	6,27 ± 2,70bcd	6,55 ± 3,45cd
	T10	5,81 ± 2,19bcdef	7,32 ± 2,30cdef	10,98 ± 4,77cde	4,85 ± 1,37abc	5,72 ± 2,59cd	6,79 ± 2,83cd
	T11	3,98 ± 2,18cdef	7,20 ± 3,30cdef	10,31 ± 3,71cde	5 ± 2abc	6,42 ± 2,15bcd	8,01 ± 3,75cd
	T12	2,58 ± 1,30def	8,39 ± 4,17bcdef	10,98 ± 5,18cde	5,04 ± 2,93abc	5,55 ± 2,13cd	7,20 ± 2,64cd
	T13	3,54 ± 1,96cdef	7,05 ± 2,07cdef	7,19 ± 2,77de	4,92 ± 1,28abc	5,46 ± 2,49cd	5,78 ± 2,52cd
T14	5,11 ± 2,36bcdef	6,08 ± 3,36def	8,37 ± 4,59	5,30 ± 2,47ab	6,38 ± 2,60bcd	6,51 ± 3,56cd	
	Moyenne V2	4,65 ± 1,67a	9,38 ± 3,03a	11,24 ± 3,75a	4,54 ± 2,28a	7,29 ± 2,86a	10,30 ± 3,46a
	Pr (>F) V	0,427ns	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	Pr (>F) T	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,9978158ns	<0,001***	<0,001***
	Pr (>F) V*T	<0,001***	0,8867ns	0,9952ns	0,9832145ns	<0,001***	<0,001***

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P< 0.05

III.1.4.2.3. Effet des traitements sur la fréquence et l'intensité de mycorhization

La Fréquence et l'intensité de mycorhization variaient significativement en fonction des variétés et des traitements dans les sites d'étude. Pour ces deux paramètres, les valeurs obtenues étaient élevées chez les traitements mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés (Tableau.XXXIV). Un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement et entre les variétés pour le paramètre fréquence de mycorhization dans le site de Bangangté. La fréquence la plus élevée (70 %) a été obtenue chez la variété R3 avec le traitement composite mycorhizé T10, suivie de la fréquence 66,67 % obtenue chez la variété TGX-1835-10 E avec le traitement mycorhizien monospore T3 et les plus faibles fréquences (6,37 et 6,67 %) avec les traitements fongicide ($T0^+$) et le témoin absolu ($T0^-$) respectivement chez la variété TGX-1835-10 E. Le traitement composite mycorhizé T10 et monospore T3 ont enregistré les fréquences les plus élevées (66,66 et 65 %), contrairement aux traitements au fongicide et témoin absolu qui ont enregistré la plus faible fréquence (10 %). En ce qui concerne l'intensité de mycorhization un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$) et entre les traitements ($<0,001$). La variété R3 a enregistré des intensités les plus élevées (1,50 et 1,43) avec les traitements mycorhizés (T10 et T3 respectivement), et la plus faible (0,07 %) chez la même variété avec les traitements au fongicide et témoin absolu. Les traitements mycorhizés T10 et T3 ont enregistré les intensités les plus élevées (1,40 ; 1,38 %) contrairement au traitement fongicide et témoin absolu (0,10 et 0,10 % respectivement).

Tout comme à Bangangté, les valeurs obtenues pour ces deux paramètres dans le site de Mfou étaient élevées chez les traitements mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés. Un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$) et entre les traitements ($<0,001$). La variété TGX-1835-10 E a enregistré des fréquences les plus élevées (66,67; 63,33 et 60 %) avec les traitements mycorhizés (T5, T4 et T14 respectivement), et les plus faibles (12,33 et 13,33 %) avec les traitements témoins ($T0^+$ et $T0^-$ respectivement), obtenus Chez la variété R3 (V2). Les traitements mycorhizés (T11, T5, T10, T12 et T4) ont enregistré les fréquences les plus élevées (55 ; 51 ; 50 ; 50 et 50 %) et les plus faibles (15 %) avec le traitement fongicide ($T0^+$) et le témoin absolu ($T0^-$). Concernant l'intensité de mycorhization, Un effet significatif a été observé entre l'interaction variété x traitement ($<0,001$) et entre les traitements ($<0,001$). La variété TGX-1835-10 E a enregistré des intensités élevées (1,60; 1,23; 1,17; 1,13 et 1 %) avec les traitements mycorhizés (T5, T11, T4, T12 et T14 respectivement) et les plus faibles (0,09 et 0,13) chez la variété R3 avec les traitements témoins ($T0^+$ et $T0^-$ respectivement). Les traitements mycorhizés (T11, T5,

T12 et T10) ont enregistré les intensités les plus élevées (1,08 ; 0,98 ; 0,96 et 0,90 %), contrairement au traitement fongicide (T0⁺) et témoin absolu (T0⁻) qui ont enregistré de très faibles valeurs (0,15 ; 0,15 %) respectivement. Il n'existe pas de différence significative entre les variétés dans les deux sites pour ces paramètres. Les traitements mycorhizés composite T10 et monospore T3 s'avèrent ainsi les mieux adaptés dans les deux sites pour ces paramètres.

Tableau XXXIII. Variation de la fréquence et l'intensité de mycorhization I(%) dans les traitements en fonction des variétés et des sites

	Bangangté		Mfou		
	Traitements	F(%)	I(%)	F(%)	I(%)
Variété TGX-1835-10 E (V1)	T0-	6,67 ± 3,05k	0,07 ± 0,02j	16,67 ± 4,16lm	0,17 ± 0,04ij
	T0+	6,67 ± 2,88k	0,07 ± 0,02j	16,27 ± 4,93lm	0,15 ± 0,05ij
	T1	43,33 ± 5,77efgh	0,57 ± 0,20ef	36,67 ± 10,40fghij	0,63 ± 0,08gh
	T2	33,33 ± 5,77hi	0,33 ± 0,05ghi	26,67 ± 5,77ijklm	0,27 ± 0,05ij
	T3	66,67 ± 5,77ab	1,33 ± 0,20ab	33,33 ± 5,77ghijk	0,73 ± 0,10fgh
	T4	33,33 ± 5,77hi	0,60 ± 0,17def	63,33 ± 10,40ab	1,17 ± 0,14bc
	T5	63,33 ± 11,54abc	1,43 ± 0,11a	66,67 ± 11,54a	1,60 ± 0,34a
	T6	16,67 ± 5,77jk	0,17 ± 0,05ij	20 ± 5klm	0,20 ± 0,04ij
	T7	33,33 ± 5,77hi	0,33 ± 0,06ghi	33,33 ± 11,54ghijk	0,33 ± 0,11ij
	T8	40 ± 10fgh	0,40 ± 0,09fgh	36,67 ± 5,77fghij	0,37 ± 0,05i
	T9	46,67 ± 5,77defg	0,40 ± 0,08fgh	26,67 ± 5,77ijklm	0,27 ± 0,05ij
	T10	63,33 ± 5,77abc	1,30 ± 0,26ab	50 ± 10bcdef	0,90 ± 0,10ef
	T11	56,67 ± 11,54bcd	0,83 ± 0,30c	56,67 ± 16,07abcd	1,23 ± 0,20b
	T12	36,67 ± 5,77gh	0,50 ± 0,17fg	46,67 ± 15,27cdefg	1,13 ± 0,37bcd
T13	33,33 ± 5,77hi	0,33 ± 0,05ghi	33,33 ± 5,77ghijk	0,6 ± 0,26h	
T14	53,33 ± 5,77cde	0,93 ± 0,05c	60 ± 15abc	1 ± 0,10cde	
Moyenne V1	39,58 ± 9,18a	0,6 ± 0,25a	38,95 ± 8,01a	0,67 ± 0,26a	
Variété R3 (V2)	T0-	13,33 ± 4,93jk	0,13 ± 0,05ij	13,33 ± 3,05m	0,13 ± 0,04j
	T0+	13,33 ± 4,93jk	0,10 ± 0,06ij	12,33 ± 3,51m	0,09 ± 0,04j
	T1	33,33 ± 5,77hi	0,33 ± 0,06ghi	36,67 ± 6,65fghij	0,63 ± 0,11gh
	T2	33,33 ± 5,77hi	0,33 ± 0,06ghi	33,33 ± 5,77ghijk	0,33 ± 0,02ij
	T3	63,33 ± 5,77abc	1,43 ± 0,15a	43,33 ± 10,40defgh	0,83 ± 0,05efg
	T4	43,33 ± 5,77efgh	0,83 ± 0,15c	36,67 ± 5,77fghij	0,37 ± 0,05i
	T5	23,33 ± 5,77ij	0,23 ± 0,06hij	36,67 ± 5,77fghij	0,37 ± 0,05i
	T6	13,33 ± 4,93jk	0,13 ± 0,06ij	50 ± 17,32bcdef	0,90 ± 0,10ef
	T7	33,33 ± 11,54hi	0,33 ± 0,11ghi	33,33 ± 11,54ghijk	0,33 ± 0,05ij
	T8	33,33 ± 5,77hi	0,33 ± 0,057ghi	30 ± 10hijkl	0,30 ± 0,05ij
	T9	40 ± 10fgh	0,40 ± 0,10fgh	36,67 ± 6,65fghij	0,37 ± 0,05i
	T10	70 ± 10a	1,50 ± 0,10a	50 ± 10bcdef	0,90 ± 0,10ef
	T11	63,33 ± 5,77abc	1,17 ± 0,20b	53,33 ± 15,27abcde	0,93 ± 0,15def
	T12	50 ± 10 def	0,77 ± 0,15cde	53,33 ± 12,34abcde	0,80 ± 0,26efgh
T13	40 ± 10fgh	0,80 ± 0,10cd	40 ± 10efghi	0,80 ± 0,10efgh	
T14	50 ± 10def	0,90 ± 0,10c	23,33 ± 5,77ijklm	0,23 ± 0,04ij	
Moyenne V2	38,54 ± 8,53a	0,61 ± 0,25a	36,45 ± 6,46a	0,52 ± 0,29a	
Pr(>F)V	0,3139ns	0,8092ns	0,2108ns	0,0633ns	
Pr(>F)T	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	
Pr(>F)V*T	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P<0,05

III.1.4.2.4. Effet des traitements sur le rendement en champ

Les rendements en t/ha obtenus variaient significativement en fonction des variétés et des traitements dans les deux sites. Ces rendements ont été en général, plus élevés chez les traitements mycorhizés et fongicide par rapport au témoin non mycorhizé (T0⁻). Dans le site de Bangangté, les rendements les plus élevés de 1,87 ; 1,67 et 1,57 t/ha ont été obtenus avec les traitements T13, T3 et T6 respectivement chez la variété TGX-1835-10 E et le plus faible (0,51 t/ha) chez la variété R3 (V2) avec le témoin absolu (Fig.57); Soit un taux d'augmentation de 152,70 ; 125,67 et 112,16 % respectivement par rapport au témoin négatif (T0⁻) et de 74,76 ; 56,07 et 46,72 % respectivement par rapport au témoin positif (T0⁺) de la même variété. La variété TGX-1835-10 E a enregistré les rendements les plus élevés par rapport à la variété R3. Indépendamment de la variété les traitements T13, T3, T6 et T14 se sont révélés meilleurs dans ce site.

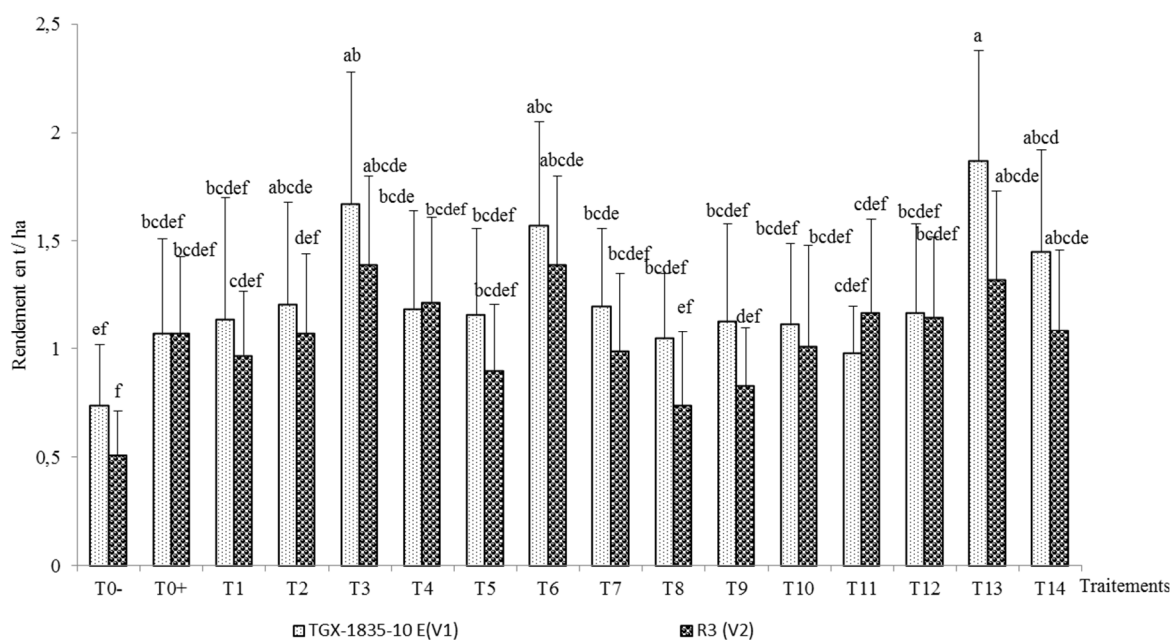


Fig. 57. Variation du rendement en t/ha entre les variétés en fonction des différents traitements dans le site de Bangangté (T0⁻: témoin négatif; T0⁺: traitement fongicide; T₁: *Gigaspora gigantea*, T₂: *Denticutata nigra*, T₃: *Entrophopora*, T₄: *Scutellospora Cerradessis*, T₅: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra*, T₆: *Gigaspora gigantea* + *Entrophopora*, T₇: *Gigaspora gigantea* + *Scutellospora Cerradessis*, T₈: *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₉: *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₀: *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₁: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₁₂: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₃: *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₄: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*)

Tout comme à Bangangté, les valeurs obtenues pour ce paramètre dans le site de Mfou étaient élevées chez les traitements mycorhizés et fongicide par rapport au traitement non mycorhizé (T0⁻). Les rendements les plus élevés (1,63; 1,50; 1,46 et 1,38 t/ha) ont été obtenus chez la variété TGX-1835-10 E avec les traitements T3, T4, T13 et T12 respectivement par rapport au témoin et le plus faible (0,49 t/ha) chez la variété R3 avec le témoin absolu (T0⁻) (Fig.58). Ainsi on a enregistré une augmentation de l'ordre de 106,32 ; 89,87 ; 84,81 et 74,68 % par rapport au témoin négatif (T0⁻) et une augmentation de 79,12 ; 64,83 ; 60,44 et 51,65 % respectivement par rapport au témoin positif (T0⁺). La variété TGX-1835-10 E s'est révélée meilleure. Indépendamment de la variété dans ce site les traitements T3, T13 et T12, se sont révélés meilleurs. Cependant les traitements T13 et T3 se sont avérés les mieux adaptés dans les deux sites.

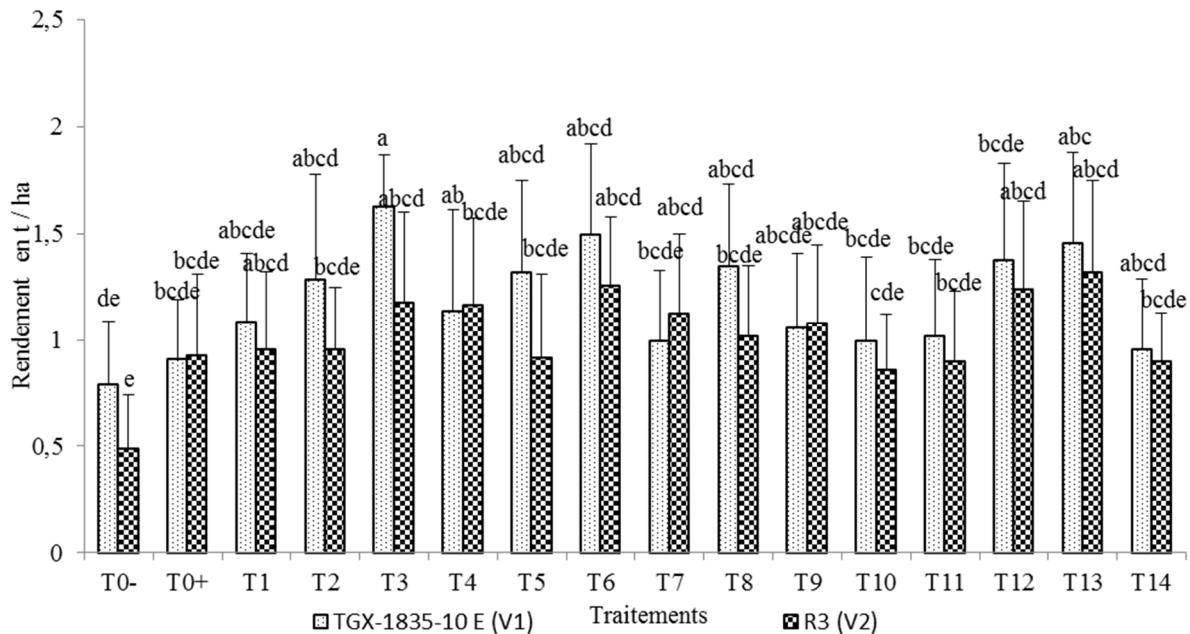


Fig. 58. Rendement en t/ha des variétés en fonction des différents traitements dans le site de Mfou (T0⁻: témoin négatif; T0⁺: traitement fongicide; T₁: *Gigaspora gigantea*, T₂: *Denticutata nigra*, T₃: *Entrophopora*, T₄: *Scutellospora Cerradessis*, T₅: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra*, T₆: *Gigaspora gigantea* + *Entrophopora*, T₇: *Gigaspora gigantea* + *Scutellospora Cerradessis*, T₈: *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₉: *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₀: *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₁: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora*, T₁₂: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₃: *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*, T₁₄: *Gigaspora gigantea* + *Denticutata nigra* + *Entrophopora* + *Scutellospora Cerradessis*)

III.1.4.2.5. Corrélation entre les paramètres évalués en champ

III.1.4.2.5.1. Corrélation entre les paramètres étudiés dans le site de Mfou

La matrice de corrélation de Pearson entre les paramètres étudiés en champ dans le site de Mfou a permis de montrer ou non des corrélations entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques, de croissance et les paramètres du rendement étudiés (Tableau XXXV). Des corrélations significativement positives (0,501** ; 0,378*) ont été enregistrées entre la fréquence de mycorhization, le nombre de feuilles (NF), le rendement (Rdt) et significativement négative (-0,391*) avec la sévérité de la maladie. Cette corrélation significativement positive (0,507** ; 0,440*) a été observée entre intensité de mycorhization, le nombre de feuilles et le rendement ; et non significative avec les autres paramètres. En effet l'augmentation de la fréquence et l'intensité de mycorhization a été proportionnelle à l'augmentation des paramètres NF, Rdt et inversement proportionnelle à la baisse de la sévérité de la maladie.

Tableau XXXIV. Matrice des coefficients de corrélation(Pearson) entre les paramètres étudiés en champ dans le site de Mfou.

Légende : F-fréquence de mycorhization en (%) ; IM -intensité de mycorhization ; I - incidence de la maladie; S-sévérité de la maladie en (%) ; NF -nombre de feuille ; DC - diamètre au collet en mm; HT - hauteur de la tige en cm; Rdt -rendement en t/ha.

	F	IM	I	S	NF	DC	HT	Rdt
F	1							
IM	0,92**	1						
I	-0,17ns	-0,29ns	1					
S	-0,39*	-0,31ns	0,294ns	1				
NF	0,50**	0,507**	-0,214ns	-0,418*	1			
DC	0,02ns	-0,09ns	0,285ns	-0,02ns	0,397*	1		
HT	0,19ns	0,103ns	0,544**	-0,04ns	-0,07ns	0,32ns	1	
Rdt	0,37*	0,440*	-0,330 ns	-0,24ns	0,59**	0,28ns	0,01ns	1

**P<0,01. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral). *P<0,05. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral)

III.1.4.2.5.2. Corrélation entre les paramètres étudiés dans le site de Bangangté

Tout comme à Mfou, La matrice de corrélation de Pearson entre les paramètres étudiés en champ à Bangangté a permis de montrer ou non des corrélations entre les paramètres de mycorhizations, épidémiologiques, de croissance et les paramètres du rendement étudiés (Tableau. XXXVI). De fortes corrélations négatives (-0,512** ; -0,405*) ont

été enregistrées entre la fréquence de mycorhization, incidence et la sévérité de la maladie respectivement d'une part et d'autre part (-0,402*) entre l'intensité de mycorhization et l'incidence de la maladie. De fortes corrélations négatives (-0,394* ; -0,512*) ont été également enregistrées entre l'incidence, le nombre de feuilles et le rendement respectivement d'une part et d'autre part (-0,433* ; -0,365*) entre la sévérité et ces deux paramètres respectivement. En effet l'augmentation de la fréquence et l'intensité de mycorhization a été inversement proportionnelle à l'incidence et à la sévérité de la maladie ; qui à leur tour ont été inversement proportionnelles aux paramètres nombre de feuilles et rendement. Autrement dit l'augmentation de la F et IM a entraîné une baisse considérable de l'incidence et de la sévérité de la maladie ; l'augmentation de l'incidence et de la sévérité a entraîné une baisse considérable du nombre de feuilles et le rendement. Cependant les deux paramètres de mycorhization ne présentent pas de corrélation significative avec les paramètres de croissances et le rendement.

Tableau XXXVI. Matrice des coefficients de corrélation (Pearson) entre les paramètres étudiés en champ dans le site de Bangangté.

Légende : F- fréquence de mycorhization en (%) ; IM - intensité de mycorhization ; I - incidence de la maladie ; S - sévérité de la maladie en (%) ; NF - nombre de feuilles ; DC - diamètre au collet en mm ; HT - hauteur de la tige en cm ; Rdt - rendement en t/ha.

	F	IM	I	S	HT	DC	NF	Rdt
F	1							
IM	0,928**	1						
I	-0,512**	-0,402*	1					
S	-0,405*	-0,301ns	0,822**	1				
HT	-0,001ns	0,001ns	0,350*	0,086ns	1			
DC	-0,153ns	-0,107ns	0,377*	0,109ns	0,834**	1		
NF	0,026ns	-0,010ns	-0,394*	-0,433*	0,216ns	0,310ns	1	
Rdt	0,270ns	0,287ns	-0,430*	-0,365*	-0,071ns	0,030ns	0,529**	1

**P<0,01. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral). *P<0,05. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral)

III.1.4.2.6. Effet de la mycorhization sur la synthèse des composés biochimiques et l'activité enzymatique en champ

La teneur en composés biochimiques (les phénols, flavonoides, tannins, e protéines totales) et les activités enzymatiques de la glucanase, peroxydase et polyphénoloxydase

obtenues ont varié en fonction des traitements dans les deux sites. Cette teneur en mg/g de matière fraîche et les différentes activités enzymatiques ont été en général significativement plus élevées ($P < 0,05$) chez les traitements mycorhizés par rapport aux traitements non mycorhizés. L'inoculation des plantes de soja par les CMA s'est caractérisée par une augmentation de la synthèse de ces différents composés et une intensification des activités enzymatiques. Dans le site de Mfou une augmentation moyenne en phénol (92,36 et 130 %), en flavonoïde (43,68 et 139,5 %), en tannins (84,21 et 250 %), en protéines (30,33 et 68,50 %), l'activité de la polyphénoloxydase (57 et 188 %), de la glucanase (142,14 et 240,7 %) et de la peroxydase (20,58 et 355,55 %), a été enregistrée pour les plantes mycorhizées par rapport au traitement au fongicide de contact ($T0^+$) et au témoin négatif ($T0^-$) respectivement chez les deux variétés (Tableau. XXXVII). Tout comme dans le site de Mfou, un taux d'augmentation moyen en phénol (56,57 et 130 %), en flavonoïde (83 et 130,89 %), en tannins (57,56 et 114,33 %), en protéines (29,38 et 52,24 %), l'activité de la polyphénoloxydase (50,9 et 148,5 %), de la glucanase (200 et 350,74 %) et de la peroxydase (4,47 et 250 %), a été enregistré pour les plants mycorhizés par rapport au traitement au fongicide ($T0^+$) et au témoin négatif ($T0^-$) respectivement chez les deux variétés dans le site de Bangangté (Tableau. XXXVII).

Tableau XXXVI. Teneur des différents composés biochimiques et activités enzymatiques

Trs- traitements; PPO- polyphénoloxydase; M- mycorhizé; NM- non mycorhizé; F- fongicide (non mycorhizé)

	Variétés	Trs	Phénol (mg/g/MF)	Flavonoïde (mg/g/MF)	Tannins (mg/g/MF)	ProtéineT (mg/g/MF)	PPO ΔA330/	Glucanase Mmol/glucos e eq.min ⁻¹	Péroxydase (UE)/min/g MF
MFOU	TGX-1835- 10 E(V1)	M	2,9±0,01a	1,5 ± 0,1a	3,8 ± 0,13a	57,5±0,1a	5,77±0,05a	874,9±3,9a	0,81±0,08a
		NMF	0,93±0,02b	0,94±0,04b	1,8 ± 0,13b	44,13±0,57b	3,53±0,25b	836,8±1,79b	0,86±0,05a
		NM	0,85±0,01c	0,45±0,05c	0,8 ± 0,1c	36,1 ± 0,53c	1,8± 0,10c	304,4±3,49c	0,04±0,01c
	R3(V2)	M	2,14±0,01a	1,23±0,14a	1,8 ± 0,1a	62,47±0,15a	4,8±0,1a	4026,5±3,01a	0,83±0,18a
		NMF	1,69±0,02b	0,96±0,02b	1,23 ± 0,15b	51±0,26b	3,2±0,1b	1187,4±2,07b	0,5±0,1b
		NM	1,34±0,02c	0,7±0,1c	0,8 ± 0,1c	37,47±0,15c	1,87±0,05c	1134,2±3,63c	0,32±0,11b
Bangangte	TGX-1835- 10 E(V1)	M	6,76±0,23a	6,87±1a	6,93 ± 0,15a	53,77±0,32a	3,54±0,34a	908,4±2,47a	0,7±0,1a
		NMF	3,75±0,26b	3,73±0,21b	4,8 ± 0,1b	36±0,26b	2,73±0,2b	838,7±1,56b	0,65±0,04a
		NM	2,57±0,21c	2,8±0,1b	3,77 ± 0,15c	30,47±0,15c	1,63±0,06c	404,3±3,45c	0,17±0,04b
	R3(V2)	M	6,58± 0,5a	7,63±0,5a	4,63 ± 0,15a	45,2±0,6a	4,76±0,05a	5026,54±3a	0,7±0,1a
		NMF	4,77± 0,2b	4,2±0,1b	2,63 ± 0,15b	40,47±0,2b	2,77±0,15b	1134,2±3,6b	0,77±0,05a
		NM	3,3 ± 0,3c	3,47±0,15c	1,67 ± 0,15c	35,4 ± 0,4c	1,7±0,2c	912,41±3,8c	0,23±0,31b

0 ‘****’ 0.001 ‘***’ 0.01 ‘**’ 0.05 Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test le test de Tukey à la probabilité P< 0,05.

III.1.4.2.7. Corrélation entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques et composés biochimiques

III.1.4.2.7.1. Analyse de la corrélation entre les paramètres étudiés dans le site de Mfou

Dans le site de Mfou, la matrice de corrélation de Pearson entre les paramètres étudiés a permis de montrer des corrélations ou non entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques, biochimiques et les activités enzymatiques étudiés (Tableau. XXXVIII). Des corrélations significativement positives (*) ont été observées entre les fréquences de mycorhization (F), les paramètres biochimiques d'une part et d'autre part entre l'intensité de mycorhization et ces différents paramètres. Le paramètre fréquence de mycorhization a été fortement corrélé ($0,762^*$; $0,818^*$; $0,722^*$; $0,740^*$) à la synthèse des flavonoïdes, des protéines totales, des phénols, et à l'activité enzymatique des PPO respectivement. L'intensité de mycorhization (IM) a été fortement corrélée ($0,815^*$; $0,831^*$; $0,803^*$; $0,779^*$) à ces différents paramètres (FL, PT, Phé et PPO respectivement). En effet la synthèse de ces différents composés était proportionnelle à la fréquence et à l'intensité de mycorhization. Des fortes corrélations négatives ($-0,761^*$) ont été enregistrées entre l'incidence de la maladie et la synthèse des Tannins; et entre la sévérité de la maladie, la glucanase et l'activité enzymatique de la polyphénoloxydases respectivement ($-0,720^*$; $-0,714^*$). En effet, la synthèse de ces différents composés était inversement proportionnelle à l'incidence et à la sévérité ; car en réalité l'augmentation de la synthèse de ces composés a entraîné une baisse considérable de ces deux paramètres.

Tableau XXXVII. Corrélation entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques et composé biochimique dans le site Mfou

Légende : F : fréquence de mycorhization ; IM : intensité de mycorhization ; I : incidence de la maladie ; S : Sévérité de la maladie ; Phé : phénol ; FL : flavonoïde ; Tan : tannins ; PT : Protéine ; Glu : Glucanase ; PPO : polyphénoloxydase ; Per : Peroxydase

	F	IM	I	S	Phé	FL	Tan	PT	Glu	PPO	Per
F	1										
IM	0,989**	1									
I	-0,073ns	-0,132ns	1								
S	-0,522ns	-0,506ns	0,400ns	1							
Phé	0,722*	0,803*	-0,265ns	-0,428ns	1						
FL	0,762*	0,815*	-0,407ns	-0,611ns	0,90**	1					
Tan	0,616ns	0,689ns	-0,748*	-0,607ns	0,806*	0,853**	1				
PT	0,818*	0,831*	-0,123ns	-0,678ns	0,837**	0,904**	0,646ns	1			
Glu	0,491ns	0,506ns	-0,246ns	-0,720*	0,55ns	0,794*	0,513ns	0,819*	1		
PPO	0,740*	0,779*	-0,579ns	-0,714*	0,845**	0,924**	0,913**	0,867**	0,698ns	1	
Per	0,526ns	0,537ns	-0,513ns	-0,557ns	0,545ns	0,813*	0,641ns	0,751*	0,847**	0,804*	1

**P<0,01. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral) *P<005. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral)

III.1.4.2.7.2. Analyse de la corrélation entre les paramètres étudiés dans le site de Bangangté

Tout comme dans le site de Mfou, La matrice de corrélation de Pearson entre les paramètres étudiés en champ dans le site de Bangangté a permis de montrer ou non des corrélations entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques, biochimiques et les activités enzymatiques étudiés (Tableau. XXXIX). Dans ce site des corrélations significativement positives (0,922** ; 0,854** ; 0,796* ; 0,959**) ont été enregistrées entre la fréquence de mycorhization et les paramètres biochimiques (Phé, FL, Tan et PT respectivement) d'une part et d'autre part (0,883* ; 0,847** ; 0,789* ; 0,916**) entre intensité de mycorhization et ces mêmes paramètres respectivement. En effet la synthèse de ces différents composés a augmenté avec était la fréquence et l'intensité de mycorhization. Cependant des corrélations significativement négatives (-0,832* ; -0,900** ; -0,886** ; -0,745* ; -0,764*) ont été enregistrées d'une part entre l'incidence de la maladie et les paramètres biochimiques (Phé, Tan, PT, Glu et Per respectivement) et d'autre part (-0,782* ; -0,865** ; -0,730* ; -0,824* et -0,814* respectivement) entre la sévérité de la maladie et ces mêmes paramètres. En effet l'augmentation de la synthèse de ces différents composés est inversement proportionnelle à l'incidence et la sévérité de la maladie ; car en réalité l'augmentation de la synthèse de ces composés entraîne une baisse considérable de ces deux dernières.

Tableau XXXVIII. Corrélation entre les paramètres de mycorhization, épidémiologiques et composé biochimique dans le site de Bangangté

Légende : F : fréquence de mycorhization ; IM : intensité de mycorhization ; I : incidence de la maladie ; S : Sévérité de la maladie ; Phé : phénol ; FL : flavonoïde ; Tan : tannins ; PT : Protéine ; Glu : Glucanase ; PPO : polyphénoloxydase ; Per : Peroxydase

	F	IM	I	S	Phé	FL	Tan	PT	Glu	PPO	Per
F	1										
IM	0,976**	1									
I	-0,822*	-0,743*	1								
S	-0,676ns	-0,613ns	0,905**	1							
Phé	0,922**	0,883**	-0,832*	-0,782*	1						
FL	0,854**	0,847**	-0,656ns	-0,702ns	0,929**	1					
Tan	0,796*	0,789*	-0,900**	-0,865**	0,725*	0,648ns	1				
P T	0,959**	0,916**	-0,886**	-0,730*	0,960**	0,82*	0,769*	1			
Glu	0,611ns	0,607ns	-0,745*	-0,824*	0,824*	0,761*	0,663ns	0,738*	1		
PPO	0,524ns	0,397ns	-0,681ns	-0,814*	0,718*	0,713*	0,525ns	0,583ns	0,680ns	1	
Per	0,689ns	0,671ns	-0,764*	-0,649ns	0,795*	0,563ns	0,624ns	0,830*	0,741*	0,465ns	1

**P<0,01. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral) *P<0,05. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

III.2. DISCUSSION

Le present travail était basé sur évaluation de l'effet des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) natifs de la rhizosphère de soja sur le developpement de *Phakopsora pachyrizi* agent causal de la rouille asiatique du soja en champ et en conditions controlées.

Les densités moyennes des spores obtenues après piégeages des CMA de la rhizosphère de soja variaient significativement en fonction des zones agro-écologiques. Cette densité de spores a été plus élevée dans les ZAE III et IV (environs 174 et 140 dans 100 g de sol) et faible dans la ZAE V (environ 24 spores dans 100g de sol). Cette variation pourrait être due aux différents systèmes d'utilisation des terres, qui pourraient créer des conditions favorables ou défavorables au développement des CMA. En effet, Menendez *et al* (2001), travaillant sur la population mycorhizienne arbusculaire associée à la végétation naturelle et cultivée sur un site de la province de Buenos Aires en Argentine ont montré que le système de gestion de sol influence positivement ou négativement la densité de spores. De même, Johnson *et al.* (2013), travaillant sur la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules indigènes associés à la rhizosphère du niébé (*Vigna unguiculata*) au Bénin, ont montré qu'il existe une différence significative entre les 8 ZAE du point de vue densité de spores. D'une manière globale, le nombre de spores moyen obtenu dans 100 g de sol variait de 24 à 174. Plusieurs auteurs tels que Amballa *et al.*,(2011); Bivoko *et al.*,(2013); Balogoun *et al.*,(2015) Leslie *et al.*, (2019) ont obtenues des valeurs relativement plus élevées allant de 46 à plus de 90 spores dans 10 g de sol; soit environ 460 à plus de 900 spores dans 100 g de sol. Cette grande différences serait due à la méthode d'extraction utilisée. Contrairement à tous ces auteurs qui avaient utilisé la méthode d'extraction assistée par centrifugation, Celle utilisée dans le cadre de cette étude a été la méthode d'extraction simple.

La caractérisation morphologique basée sur la couleur, la taille et la structure d'ornementation a permis de répertorier 16 morphotypes classés en 9 genres, avec la dominance du genre *Gigaspora*. En effet Weiguang *et al.*, (2013), travaillant sur la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires des sols de la rhizosphère de divers cultivars de soja sous différents régimes de culture ont recensé 16 morphotypes donc il a regroupé en 3 genres avec la dominance du genre *glomus*. Ces différences pourraient être dues d'une part à la méthode d'identification des spores qui a été basée pour ces auteurs sur la PCR-DGGE, d'autre part aux précédents culturaux et l'adaptation des souches à l'écologie du milieu tels que montré par Houngnandan *et al.*, 2009. Ces resultats se rapprochent de ceux de Johnson *et al.*, (2013) qui ont obtenus 15 espèces dans la rhizosphère du niébé respectivement au Bénin et

au Sénégal. Les résultats rapportés par cette étude montrent que la diversité des CMA varie significativement dans les cinq ZAE du Cameroun avec la dominance du genre *Gigaspora* suivie du genre *Entrophospora*. Cependant Ngonkeu *et al.* (2003) ont montré d'une manière générale que les cinq ZAE du Cameroun sont dominées par les genres *Glomus* suivie du genre *Gigaspora*.

La fréquence de mycorhization a varié significativement entre les ZAE, avec une fréquence de mycorhization allant de 14 à 46 %. Cette variation s'expliquerait d'une part, par le précédent cultural. En effet, Weiguang *et al.* (2013), ont démontré que la culture continue du soja augmenterait la fréquence de mycorhization. C'est le cas dans cette étude où les fortes fréquences de mycorhization ont été obtenues dans les ZAE I et II. Cette variation de la fréquence de mycorhization pourrait s'expliquer par les paramètres chimiques du sol. En effet cette étude fait état d'un pourcentage de colonisation racinaire élevé dans les ZAE présentant une faible teneur en phosphore et faible dans les ZAE présentant une forte teneur en phosphore. Kahiluoto *et al.* (2001), travaillant sur la promotion de l'utilisation des CMA pour la réduction de la fertilisation phosphatée ont montré que la réduction de la colonisation racinaire des plantes a été corrélée à l'augmentation de la teneur en phosphore assimilable du sol. De plus les faibles fréquences de mycorhization observées pourraient être dues à une utilisation des fertilisants chimiques. Mbogne *et al.* (2015), travaillant sur la biodiversité des champignons mycorhiziens à arbuscules des citrouilles (*Cucurbita* sp.) sous l'influence des engrais dans les sols ferrallitiques du Cameroun et du Bénin, ont montré que l'utilisation des engrais chimiques influence négativement la fréquence de mycorhization.

Les résultats de la caractérisation macroscopique et morphométrique des isolats de *P. pachyrhizi* ont présenté une variabilité des caractères morphologiques. En effet, Bonde & Brown (1980) ; Roxana *et al.* (2016), travaillant respectivement sur la comparaison morphologique d'isolats de *P. pachyrhizi* provenant de différentes régions du monde et sur la germination et infection de *P. pachyrhizi* sous environnement simulé de la zone centrale en Argentine, ont obtenu des morphologies qui varient d'ovoïde à ellipsoïdale. Au total 7 formes ont été identifiées, avec l'apparition de deux nouvelles formes d'urédospores de *P. pachyrhizi* dans les différentes zones agro-écologiques; faisant ainsi état d'une grande variabilité des urédospores de *P. pachyrhizi* au Cameroun. En effet Sachin *et al.*, (2020) ont observé et identifié au total 03 formes d'urédospores de *P. pachyrhizi* dans différentes localités de Karnataka en Inde. De façon globale, les tailles des urédospores obtenues dans les ZAE ne présentent aucune différence significative. Néanmoins, quelques différences significatives existent entre les largeurs. Les longueurs varient de 25,40 à 27,64 μ m ; les largeurs de 16,64 à

19,61 μm et le rapport L/l de 1,45 à 1,57. Les variations obtenues seraient dues à la variabilité des formes en présences. Ces résultats sont en accord avec le travail d'Ono *et al.* (1992) qui ont montré que les longueurs des urédospores variaient de (18 à 34 μm) et les largeurs (15 à 24 μm). Par contre Igarashi *et al.* (2012), travaillant sur la morphologie comparée entre les urédospores des espèces d'importance agricole, ont obtenus des longueurs et largeur allant de 26 à 39 et 19 à 25 respectivement. Les isolats de *P. pachyrhizi* obtenues des différentes ZAE se sont révélés tous pathogènes avec une variabilité de l'agressivité en fonction des isolats. Les isolats GA1, WA, MB, BAM et MF2 ont été plus agressifs par rapport aux isolats MO, TO et BA1. La variabilité de l'agressivité entre les isolats pourrait être due à la variabilité des gènes de virulence ou à la fusion des tubes germinatifs dans des urédospores en germination, créant un réseau d'hyphes complexe, dans laquelle migrent les noyaux pour former les hyphes multi-nucléés comme l'ont démontré Vittal *et al.* (2011). En effet, ces auteurs ont démontré que l'anastomose et la formation des hétérocaryons serait à l'origine de la variabilité génétique des gènes de virulence chez les populations de *P. pachyrhizi*. La variabilité de l'agressivité peut également être fonction de leur réaction sur des hôtes différents tels que l'affirment Bonde *et al.* (2006) ; Miles *et al.* (2006) ; Pham *et al.* (2009).

Les résultats obtenus sur l'incidence et la gravité de la maladie de la rouille asiatique du soja sur les 43 variétés ont montré que la maladie a varié entre les variétés au fil du temps. R3 et TGX-1448-2E ont eu l'incidence la plus élevée par rapport aux autres variétés. Cette variation pourrait être due à la disponibilité des inocula et aux différentes interactions hôtes-variétés. Mahesha *et al.* (2009), travaillant sur l'évaluation de 204 génotypes de soja dans des conditions contrôlées contre les principales maladies, ont signalé plusieurs génotypes avec des sources multiples de résistance. L'incidence élevée de certaines variétés par rapport à d'autres pourrait être due à la sensibilité de ces variétés par rapport aux autres, ou aux conditions environnementales comme rapporté par Schilling (1996).

En ce qui concerne la sévérité, les valeurs les plus élevées sont obtenues sur les variétés TGX-2002-14DM et TGX-2011-7F, contrairement aux variétés AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM, qui ont présenté des incidences et sévérités nulles à 6 SAS. La variation de la sévérité d'une variété à l'autre pourrait être justifiée par la virulence des souches et les conditions environnementales car le développement de la maladie résulte de l'interaction dynamique entre la plante hôte, l'agent pathogène et l'environnement (Adhikari *et al.*, 1994). La forte sévérité de la rouille asiatique chez certaines variétés pourrait également être due à la variabilité des souches pathogènes de *P. pachyrhizi*. Selon Ddamulira *et al.* (2014), le

changement de pathogène est l'une des causes de différentes souches dans les différentes zones agro-écologiques. Le fait que les variétés AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-1448-2E, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM aient présenté une sévérité nulle à 6 SAS pourrait être dû à la présence de gènes de résistance à la maladie dans leurs génotypes. En effet, des travaux sur l'identification de sources multiples de résistance aux maladies dans le soja cultivé et sauvage ont été entrepris par de nombreux chercheurs (Mahesha *et al.*, 2007 ; Mahesha *et al.*, 2009 et Ingle *et al.*, 2016).

Les rendements obtenus varient en fonction des variétés. Les faibles rendements enregistrés, particulièrement ceux des variétés R3 (0,17 t/ha) et R2 (0,19 t/ha) pourraient être dus à la pression des maladies qui réduiraient la surface foliaire des plantes et par conséquent l'activité photosynthétique comme montrés par Ngueguim *et al.* (2011) ; Djeugap *et al.* (2014). Ils pourraient également être liés à l'amélioration des caractéristiques génétiques des différentes variétés ; ce qui expliquerait pourquoi certaines variétés ont des rendements élevés (TGX-2010-12F) et d'autres faibles. Senan *et al.* (2007), travaillant sur les performances de six cultivars de tomates contre le jaunissement en cuillère des feuilles, le flétrissement bactérien et les nématodes à galles, ont montré qu'une différence de rendement entre les variétés au cours d'une même saison est aussi due à la variété elle-même.

Le dendrogramme réalisé en fonction des trois paramètres (incidence, sévérité et rendement) a permis de les regrouper en variétés moyennement résistant, susceptible et très susceptible. Ceci pourrait être justifié par l'approximation des moyennes des incidences, sévérités et rendements des différentes variétés. Zade *et al.* (2018) et Bachkar *et al.* (2019), travaillant respectivement sur le Screening de 33 génotypes de soja contre l'alternariose et le Screening de 36 génotypes de soja contre le virus de la mosaïque, les ont regroupés en quatre groupes (résistant, moyennement résistant, moyennement susceptible et susceptible). Chavan *et al.* (2018) travaillant sur le Screening de 40 génotypes contre *Colletotrichum truncatum*, les ont plutôt regroupés en moyennement résistant, moyennement susceptible, susceptible et très susceptible.

L'effet des champignons mycorhiziens à arbuscules sur les paramètres de croissance (hauteur de la tige, diamètre, nombre de feuilles) en serre et en champ à 10 SAS font état d'une augmentation de ces différents paramètres chez les traitements mycorhizés par rapport aux non mychorizés chez les deux variétés ; mais ne présente pas un effet significatif pour le paramètre diamètre au collet entre les traitements mycorhizés et le témoin absolu en champ. En serre les inocula T6, T3, T7 et T5 améliorent la croissance en hauteur respectivement de 119,23 ; 114,24 ; 113,21 et 112,53 % par rapport au témoin absolu; le diamètre au collet subit

une augmentation de l'ordre de 109,91 ; 105,78 ; 105,37 et 96,69 % avec les traitements mycorhizés composites T8, T6, T10 et monospore T3 respectivement par rapport au témoin négatif; le nombre de feuilles de 347,11 ; 369,33 ; 322,22 et 314,88 % avec les traitements mycorhizés monospores T3 et composites T8, T10, T13 respectivement par rapport au témoin négatif. En champ, dans le site de Bangangté, une augmentation de la hauteur de la tige de l'ordre de 30,32 ; 28,39 et 28,31 % avec l'inoculum monospore T2, les composites T13 et T6 ont été obtenue par rapport au témoin absolu. A Mfou, les traitements mycorhiziens monospore (T1) et composite (T9 et T13) ont amélioré la hauteur de l'ordre de 20,69 ; 19,19 et 18,71 % respectivement. Concernant le paramètre nombre de feuilles dans le site de Bangangté, une augmentation de l'ordre de 37,62 ; 33,35 et 33,10 % a été enregistrée avec les composites mycorhizés T13, T6 et monospore T2 respectivement par rapport au témoin absolu. A Mfou une augmentation de l'ordre de 27,79 ; 26,37 ; et 25,85 % a été enregistrée avec les inocula T2, T5 et T3 respectivement. Ces résultats pourraient s'expliquer par l'amélioration de la nutrition minérale du soja par les souches symbiotiques indigènes inoculées. Cette amélioration par les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) s'est manifestée d'abord par l'infection mycorhizienne puis par l'amélioration de l'absorption des éléments nutritifs qui influent positivement sur la croissance de la biomasse. Ces résultats sont similaires à ceux de Gnamkoulamba *et al.* (2018); Hadou et kadidia (2020) qui lors des travaux similaires en pépinière et en champ respectivement sur le riz (*Oryza Sativa* L.) avec des souches de champignons mycorhiziens arbusculaires commerciales et sur le sésame (*Sesamum indicum* L.) avec des souches de CMA indigènes ont montré que leur inoculation améliore les paramètres de croissance de ces deux plantes. Des résultats analogues ont été trouvés par Diop *et al.* (2013) qui ont montré que la production de la biomasse de *Vigna* est améliorée par l'inoculation mycorhizienne. Ces résultats obtenus avec les inocula monospécifiques et les composites pourraient également être attribués d'une part à la densité des inocula monospécifiques (Cheng & Tu 1986) et d'autre part à l'effet synergique des souches. En effet Haro (2011) a montré que les souches indigènes contenant au moins 2 genres ont des effets qui peuvent s'ajouter comparé aux inocula monospécifiques, étant donné que les endomycorhizes n'entrent pas en compétition. L'absence d'effet significatif pour le paramètre diamètre au collet entre les traitements mycorhizés et le témoin absolu dans les deux sites pourrait être attribué à l'efficacité des CMA naturelles rencontrés dans chaque site d'étude d'une part et d'autre par à l'effet variétal.

Les résultats en serre et en champ sur le taux d'expansion (incidence) et gravité de l'infection (Sévérité) ont montré que les traitements mycorhizés ont fortement réduit la

sévérité de la maladie comparé au traitement non mycorhizés (traitements aux fongicides chimiques et au témoin T0) chez les deux variétés. En serre, à 10 SAS les plus faibles sévérités (1,67 ; 1,67 et 2 %) ont été obtenues chez la variété TGX-1835-10 E avec les traitements composites mycorhiziens T6, T9 et T14 respectivement ; les plus élevées (73,33 %) avec le témoin absolu, suivie du traitement au fongicide (28,17 %) chez la variété R3. En champ dans le site de Bangangté une réduction de la sévérité de l'ordre de 62,12; 61,96 et de 60,18 % a été obtenue avec le traitement T14, T13 et T6 respectivement comparé au témoin T0 et de 38 ; 37,74 et 34,83 % respectivement avec les mêmes traitements comparé au traitement fongicide. Dans le site de mfou les résultats font état d'une réduction de l'ordre de 89,31 %; 89,11 %; 88,90 % avec le traitement T3, T13 et T6 respectivement comparé au témoin T0. Néanmoins Il n'existe pas de différence entre les traitements mycorhizés et le traitement fongicide non mycorhizé a cette période dans ce site. Cette réduction considérable de la maladie pourrait être attribuée à l'inoculation des souches mycorhiziennes qui auraient favorisé l'induction de gènes régulateurs liés à la défense dans les feuilles de soja et auraient conféré une résistance au pathogène. Campos *et al.* (2011) l'avaient montré lorsqu'ils travaillaient sur l'induction systémique des gènes de résistance par la symbiose mycorhizienne à arbuscules sur le riz. Dalia *et al.* (2019) ont également montré que les champignons mycorhiziens arbusculaires déclenchent l'expression transcriptionnelle des flavonoïdes et de l'acide chorogéniques, voie de biosynthèse des gènes de la tomate contre le virus de la mosaïque. En effet des fortes corrélations positives ont été enregistrées en serre et en champ entre fréquence, intensité de mycorhization et augmentation de la synthèse des composés biochimiques tels que les phénols, les flavonoïdes (flavons), les tannins, les protéines et l'augmentation de l'activité enzymatique de la PPO et Per qui agirait dans les mécanismes de défense de la plante et réduiraient le développement de la maladie. La réduction significative de la maladie pourrait être également attribuée à la stimulation par les CMA de la synthèse des nouveaux composés tels que Quercetine 3-o-glucoside-7-o-rhamnoside qui est une dérivée de la quercetine démontré par Lygin *et al.* (2009); Genisteinmalonylglycoside, Genistein 4,7-odiglycosidemethylmalonyle qui sont les dérivées de la Genisteine et la daidzeine démontré par Diego *et al.*, (2018). Ces résultats pourraient être attribués entre autres à l'effet variété car la variété TGX-1835-10 E est une variété apparemment résistante contrairement à la variété R3 qui est sensible. De plus la réduction observée pourrait être attribuée à l'action combinée de l'inoculation mycorhizienne et de la lumière. En effet Pozo *et al.* (2021) ont montré lorsqu'ils travaillaient sur La résistance induite par les mycorhizes aux agents pathogènes foliaires découplés des effets nutritionnels

sous différentes intensités lumineuses. En outre, cette réduction pourrait également être attribuée à l'abondance des inocula monospécifiques d'une part et d'autre part à l'effet synergique entre les souches (composites) et les champignons endophytes ou rhizobactéries du sol (en champ). En effet Chen *et al.* (2019) travaillant sur l'amélioration de la résistance de *Wedelia trilobata* contre les maladies par les CMA a montré que la faible progression de la maladie en présence d'une faible teneur en éléments nutritifs (N) était due à l'abondance de *Glomus versiforme*. De plus, l'effet synergique entre les champignons endophytes et rhizobactérie du sol pour accroître la résistance des plantes aux maladies ont été montré par Li *et al.* (2017); Perezdeluque *et al.* (2017). L'absence de différence significative entre les traitements mycorhizés et le traitement fongicide non mycorhizé dans le site de mfou en champ pourrait être attribué à l'efficacité des CMA naturelles rencontrés dans ce site.

Les résultats sur la mycorhization en serre et en champ ont montré des taux de colonisations (fréquence) racinaires variable en fonction des variétés, des traitements et des sites. En serre, ces taux variaient de 30 à 73,33 % et de 20 à 63,33 % respectivement chez les deux variétés (TGX-1835-10 E et R3). Ces forts taux pourraient être dus à une faible disponibilité du phosphore assimilable. Kahiluoto *et al.* (2001) ont montré que des forts taux de colonisation racinaire sont corrélés à la faible teneur en phosphore assimilable. L'absence d'infection mycorhizienne sur les racines des témoins montre que les traitements sont exempts de toute contamination mycorhizienne. En champ, la colonisation a été observée aussi bien chez les plantes inoculées que non inoculées. Chez les plantes inoculées, le taux de mycorhization dans le site de Bangangté variait de 13,33 à 70 % chez les deux variétés. A Mfou elle variait de 20 à 66,7 %. Cette variabilité s'expliquerait par une incompatibilité des espèces ou souches de CMA avec la plante hôte. En effet Öpik et Moora, (2012), travaillant sur le Nœuds et liens manquants dans les réseaux mycorhiziens, avaient montré qu'il pourrait exister une spécialisation réciproque entre les plantes et les champignons. Cette variabilité peut être attribuée à leurs habitats, leurs niches écologiques et leurs compétitions vis-à-vis des champignons natifs du sol tels que montré par Verbruggen *et al.*, (2013). En outre, le taux de colonisation des cultivars de soja inoculés avec les CMA pourrait être dû à la réduction progressive du phosphore disponible dans les sols pendant la culture et aux exigences plus élevées en éléments nutritifs de la plante hôte. En effet Haro *et al.* (2012) ont montré que la symbiose mycorhizienne s'établit et se développe sur le niébé avec l'épuisement des éléments minéraux directement accessible aux racines dans le sol. Ces résultats se rapprochent à ceux d'Adeyemi *et al.* (2019) qui travaillant sur L'Effet de l'inoculation commercial de champignons mycorhiziens arbusculaires sur la croissance et rendement du soja dans des

conditions contrôlées et naturelles de terrain ont obtenu chez les plantes inoculées des taux de colonisation racinaires en champ allant jusqu'à 76 % chez les différents cultivars. La mycorhization des plantes non inoculées a été inférieure à 16,68 % dans les deux sites. Cette mycorhization serait due aux CMA indigènes nactifs que regorge le sol des sites d'expérimentation.

Les rendements en grains (t/ha) obtenus en serre et en champ variaient en fonction des traitements, des variétés et des sites. Ces rendements (t/ha) étaient en général plus élevés chez les plantes mycorhizés par rapport aux témoins non mycorhizés. En serre, une augmentation de l'ordre de 515,78; 478,94 et 473,68 % par rapport au témoin négatif T0 (0,19 t/ha) a été notée par rapport aux autres respectivement chez la variété TGX-1835-10 E (V1). En champ, les rendements les plus élevés ont été obtenus chez la variété TGX-1835-10 E dans les deux sites par rapport à la variété R3; soit 1,87 ; 1,67 et 1,57 t/ha obtenus avec les traitements T13, T3 et T6 respectivement à Bangangté et 1,63 ; 1,50 ; 1,46 et 1,38 t/ha avec les traitements T3, T4, T13 et T12 respectivement à Mfou. Ces résultats pourraient être attribués aux souches symbiotiques indigènes inoculées, qui par amélioration de la nutrition minérale entraîneraient une augmentation de la biomasse qui accroît l'activité photosynthétique et impacte positivement sur les rendements. En effet, Haro *et al.* (2017) ont montré que l'inoculation avec les microorganismes indigènes améliore la production de biomasse aérienne et impacte positivement sur l'augmentation du rendement du niébé. Ces résultats pourraient également être attribués à la stimulation des mécanismes de défense de la plante qui accroissent la résistance des plantes aux maladies et réduiraient les pertes de rendement causées par le pathogène. Elles pourraient également être attribués à l'effet variété d'une part et d'autre part à la densité des inocula monospécifiques et ou à l'effet synergique des composites (Hadou & kadidia, 2020).

CHAPITRE IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

IV.1. Conclusion

Le présent travail avait pour objectif général d'évaluer l'effet des CMA sur le développement de *Phakopsora pachyrhizi* agent causal des rouilles dans la production du soja au Cameroun.

L'étude sur la diversité des CMA de la rhizosphère fait état d'une variabilité de la densité en fonction du nombre de, de la couleur, des structures caractéristiques, et du diamètre des spores de la rhizosphère du soja dans les ZAE. La ZAE III et IV ont présente le nombre de spores le plus élevé. Les ZAE II et III présentent une plus large diversité du point de vue couleur-. Du point de vue taille, le tamis de maille 125 μ m a présenté la plus grande densité de spores. L'étude de la diversité révèle la présence de 16 morphotypes regroupés en 9 genres (*Gigaspora* *Entrophopora* *Scutellospora* *Dentiscutata* *Rhizophagus* *Paraglomus* *Clarodeoglosum* *Racocetra* *Diversipora*), cinq familles, deux ordres, une classe, un embranchement, avec la dominance du genre *Gigaspora* et *Entrophopora*. Les indices de diversité sont faibles dans les ZAE.

Les résultats sur la caractérisation des isolats de *Phakopsora pachyrhizi* au Cameroun présentent une variation significative des caractères morphologiques des urédospores du pathogène. 7 formes ont été observées avec apparition de deux nouvelles formes, pépiniforme et anguleuse. Les longueurs et le rapport L/l des urédospores ne présentent pas de différence significative en fonction des ZAE, mais leurs largeurs présentent des différences significatives entre les isolats de la ZAE II et ceux des autres ZAE. Les longueurs varient de 25,40 à 27,64 μ m ; les largeurs de 16,64 à 19,61 μ m et le rapport L/l de 1,45 à 1,57. Les 34 isolats de *P. pachyrhizi* obtenus sont pathogéniques avec un degré d'agressivité variant d'un isolat à un autre au 14ème JAI. Les isolats les plus agressifs ont été obtenus dans les ZAE II (GA1, WA, MB), ZAE III (BAM) et la ZAE V (MF2).

Par rapport à la sensibilité de 43 variétés de soja dans des conditions d'infection naturelle à la rouille asiatique du soja sur le rendement, Il a été constaté que les variétés R3 et TGX-1448-2E avaient les plus fortes incidences. Les variétés TGX-2002-14DM et TGX-2011-7F présentent la gravité la plus élevée de la maladie de la rouille asiatique à 10 SAS ; contrairement aux variétés AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-1448-2E, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM qui ont une incidence et une gravité nulles à 6SAS. Les variétés TGX-2010-12F (1,17 t/ha), TGX-2010-3F (0,78 t/ha) ont les rendements les plus élevés, contrairement à la variété R3 (0,17t/ha.). Le dendrogramme a

permis de les regrouper en variétés très sensibles (R3, SCS-1), sensibles (AFAYAK, TGX-1835-10E) et moyennement résistant (TGX-2010-12F, TGX-2010-3F). Ces variétés moyennement résistantes peuvent être conseillées aux producteurs avec des méthodes de protection appropriées ou faire l'objet d'une amélioration variétale par des techniques génétiques.

Les résultats de l'essai réalisé en serre sur les paramètres de croissance comme la hauteur de la tige, le diamètre au collet, le nombre de feuilles montrent que la mycorhization influe positivement sur ces différents paramètres. Les résultats sur les paramètres épidémiologiques (incidence et sévérité) montrent une corrélation fortement négative entre ces paramètres, les paramètres de mycorhization, la synthèse des composés biochimiques et les activités enzymatiques. Ainsi la mycorhization réduit significativement la sévérité de la maladie chez les deux variétés comparée au traitement fongique ($T0^+$) et au témoin négatif ($T0^-$). Les sévérités les plus faibles ont été obtenues chez la variété TGX-1835-10 E avec les traitements T6, T9 et T14 et les plus élevés chez la variété R3 (73,33 %) avec le témoin absolu. Dans l'ensemble, des taux de réduction de l'ordre de 97,22 ; 95,55 ; 95,26 ; 95,26 % respectivement ont été obtenus avec les traitements mycorhizés T9, T6, T14, T13 et de 63,79 % avec le traitement au fongicide par rapport au témoin négatif. L'inoculation avec les souches indigènes accroît les rendements par rapport aux plantes non inoculées. Les rendements les plus élevés ont été obtenus chez la variété TGX-1835-10 E avec les traitements T13, T3, T6 et le plus faible chez la variété R3 (0,05 t/ha) avec le témoin négatif. Dans l'ensemble une augmentation de l'ordre de 89,52 ; 89,52 ; 89,32 % avec le traitement T6, T13 et T14 par rapport au témoin négatif et de 48,57 ; 48,57 ; 47,57 % par rapport au traitement au fongicide respectivement, a été obtenue.

Les résultats obtenus en champ sur la croissance du soja montrent que L'inoculation mycorhizienne entraîne une augmentation significative de la hauteur de la tige, le nombre de feuilles, mais ne présente pas d'effet significatif pour le paramètre diamètre au collet dans les deux sites. L'inoculation mycorhizienne et le traitement au fongicide entraînent une réduction significative de la sévérité de la maladie. Dans l'ensemble des taux de réduction de l'ordre de 62,12 ; 61,96 ; 60,18 et 38,90 % ont été obtenus respectivement avec les traitements T14, T13, T6 et le traitement au fongicide comparé au témoin négatif dans le site de Bangangté. Dans le site de Mfou des taux de réduction de l'ordre de 89,24 ; 89,11 ; 88,90 ; 82,25 % ont été obtenus respectivement avec le traitement T3, T13, T6 et le traitement au fongicide comparé au témoin négatif. L'inoculation avec les souches indigènes accroît les rendements par rapport aux plantes non inoculées. Les rendements les plus élevés ont été obtenus chez la

variété TGX-1835-10 E et le plus faible chez la variété R3 dans les deux sites. Dans l'ensemble des taux d'augmentation de l'ordre 61 ; 59,21 ; 57,82 et 50,79 % ont été obtenus respectivement avec le traitement mycorhizés T13, T3, T6 et T14 par rapport au témoin négatif (0,62 t/ha) dans le site de Bangangté et de l'ordre de 53,95 ; 53,95 ; 51,14 % avec les traitements T3, T13, T12 dans le site de Mfou par rapport au témoin négatif (0,64t/ha). L'inoculation des plantes de soja par les CMA indigènes favorise le développement des paramètres de croissance, le rendement et augmente la résistance des plantes par stimulation des mécanismes de défense dans les conditions favorables de culture.

IV.2. Perspectives

Ce travail était basé sur les propriétés inductrices des mécanismes de défense des plantes à la maladie de la rouille asiatique du soja suite à une inoculation des CMA. Les résultats obtenus pourraient servir de base pour les recherches ultérieures dont les grands axes pourraient être :

- faire une analyse moléculaire sur les CMA extraits de la rhizosphère de soja au Cameroun ;
- réaliser une étude sur la diversité génétique des isolats de *P. pachyrhizi*. au Cameroun ;
- évaluer l'effet des CMA native du soja sur une plus large gamme variétale et dans d'autres ZAE.
- réaliser une analyse quantitative sur les métabolites secondaires synthétisés et spécifiques, lié à l'inter action *P. pachyrhizi-Glycine max* et CMA.
- étudier l'interaction CMA et bactéries du sol lors de la mycorhization
- étudier l'effet de la double symbiose Rhizobium CMA sur le developpement de la rouille asiatique du soja

BIBLIOGRAPHIE

- Abad A., Loveras J., Michelena A., and Ferrán J., 1996. Effect of nitrate levels and N fertilization on bread and durum wheat yield and quality and on residual N-NO₃ concentration under irrigation in the Ebro Valley (Spain). *In: Proc. Congr. Eur. Soc. of Agron: 4th, Veldoven, the Netherlands. 7–11 July, pp.514– 515.*
- Abbas Y. 2014. Microorganismes de la rhizosphère des Tétracélinées : un outil pour optimiser la régénération assistée du *Tetracelinis articulata* Vahl. Master. Thèse de doctorat, université Mohammed V, faculté des sciences, Rabat, 177 p.
- Abdul R.W., Michael G.P., Tariq A., Abdul A.B., Barkat H., Savarimuthu I. and Hari C.S., 2012. Mechanisms of Plant Defense against Insect Herbivores. *Plant Signaling & Behavior*, 7(10): 1306-1320
- Adeyemi N.O., Atayese M.O., Olubode A.A., & Akan M.E., 2019. Effect of commercial arbuscular mycorrhizal fungi inoculant on growth and yield of soybean under controlled and natural field conditions. *J. of Plant Nutr.*, 1–13.
- Adhikari T.B., Mew T.W., Teng P.S., 1994. Progress of bacterial blight on rice cultivars carrying different Xa genes for resistance in the field. *plant Dis.*, 78: 73-77.
- Akinsanmi O.A., Ladipo J.L., and Oyekan P.O., 2001. First report of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Nigeria. *Plant Dis.*, 85: 97.
- Al-Karaki G.N., 2000. Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. *Mycorrhiza*, 10: 51–54.
- Ambang Z., Ngoh Dooh J.P., Essono G., Ndongo B., Chewachong G. & Asseng C., 2010. Effect of *Thevetia peruviana* seeds extraction in vitro growth of four strains of *Phytophthora megakarya*. *Plant omics J.*, 3 (3): 70-76.
- Amballa D., Bhumi N., Reddy, 2011. Occurrence and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and microbial flora in the rhizosphere soils of mungbean [*Vigna radiata* (L.) wilczek] and soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] from Adilabad, Nizamabad and Karimnagar districts of Andhra Pradesh state, India. *Advances in Biosci. and Biotech.*, 2: 275-286
- Anissa Lounes-Hadj S., 2013. La Mycorrhize à arbuscules : quels bénéfices pour l'homme et son environnement dans un contexte de développement durable ? *Rev. Sci. Technol.*, 26: 06 -19.
- Anonyme 1, 2011. Soybean and oil crops: <http://www.ers.usda.gov/Briefing/SoybeansOilcrops/trade.htm>
- Anonyme 2, 2021. FAOSTAT Statistics database; Annual production of soybeans. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize> (accessed September 1st 2021)
- Anonyme 3, 2013. Contribution de la recherche à l'amélioration de la production et la consommation des légumineuses alimentaires au Cameroun. Institut de recherche agronomique pour le développement (IRAD). Projet 6 légumineuse, PP. 8-9
- Anonyme 4, 2021. Investir au Cameroun. <https://www.investiraucameroun.com/investir-au-cameroun/0909-13193-le-cameroun-depense-chaque-annee-14-milliards-de-fcfa-dans-l-importation-du-soja>.
- Anonyme 5, 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Accessed on 7 January 2021

- Anonyme 1, 2011. Agriculture. Institut national de la statistique. Yaoundé, 11 p.
- Anonyme 6, 1996. La biologie du *Glycine max* (L.) Merr. (Soja). Agence canadienne d'inspection des aliments. Cahier parallèle à la Directive 94-08, Critères d'évaluation du risque environnemental associé aux végétaux à caractères nouveaux. 12 p.
- Anonyme 7, 2000. Consensus document on the biology of *glycine max* (Soybean). OCDE, (15) :1-22.
- Anonyme 8, 2006. Profil de la culture du soja au Canada. Programme de réduction des risques liés aux pesticides. 52 p.
- Anonyme 9, 2004. National nutrient database for standard reference. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Nutrient Data Laboratory. release 17. Beltsville, 49 p.
- Anonyme 10, 2009. Les maladies des grandes cultures: maladie du soja. MAAAR. Ontario 4 p.
- Antoine B.B.B., Hilaire K.T., Koffi K.G., Fernand K., Seydou T., Mamadou C., Bomisso L., Daouda K., 2015. Inhibition de *Sclerotium rolfsii* sacc. (Corticaceae), agent causal de la pourriture du collet de la tige de la tomate (solanaceae), par *Xylopiia aethiopica* (dunal) a. Rich (annonaceae) et *Trichoderma* sp. *Eur.Scientific J.*, 11(12): 1857–7881.
- Antoine B & Flora L., 2005. Les stimulateurs des défences naturelles des plantes (SDN). DAA protection des plantes et environnements ENSAM, ENSAR & INA P-G. 18p.
- Arianne T., Parsa H., Nadim W.A., Shuxian Li and Benjamin F.M., 2011. Gene Expression in Leaves of Susceptible Glycine max during Infection with *Phakopsora pachyrhizi* Using Next Generation Sequencing. *researchgate* 14 p.
- Aroca R., Porcel R., Ruiz-Lozano J.M., 2007. How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in *Phaseolus vulgaris* under drought, cold or salinity stresses? *New Phytologist* 173: 808–816.
- Asada K. 1992. Ascarbate peroxydase a hydrogen peroxide scavenging enzyme in plants. *Physiol. Plant.* 85: 235-241.
- Auge R.M., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11: 3-42.
- Augé R.M., Toler H.D. & Saxton A.M., 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, 25: 13-24.
- Azcón-Aguilar C., Barea J., 1996. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens-An overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza*,: 457–464.
- Baaziz M., Hadrami E.L.I., 1995. Somatic embryogenesis and analysis of peroxydase in *Phoenix dactylifera*. *Biologia plantarum*, 37: 197-203.
- Bachkar C.B., Balgude Y.S, Shinde P.B. and Deokar C.D., 2019. Screening of soybean genotypes against soybean mosaic virus under natural and glass house conditions. *Int. J. of Chi. Sturdies*, 7(1): 2267-2269.
- Balogoun I., Saïdou A., Kindohoundé N.S., Ahoton E.L., Amadji G.L., Ahohuendo B.C., Babatoundé S., Chougourou D., BabaMoussa L., Ahanchédé A., 2015. Soil Fertility

- and Biodiversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Cashew's *Anacardium occidentale* L. Cultivars Characteristics in Benin West Africa. *Int. J. of Plant and Soil Sci.*, 51: 50-63.
- Barbehenn R.V., Peter Constabel C., 2011. Tannins in plantherbivore interactions. *Phytochemistry*.72:155-165
- Barea JM, Honrubia M. 1993. Micorrizas y revegetación. *Ecosistemas*, 4: 46-47.
- Bárzana G., Aroca R., Bienert G.P., Chaumont F. & Ruiz-Lozano J.M., 2014. New insights into the regulation of aquaporins by the arbuscular mycorrhizal symbiosis in maize plants under drought stress and possible implications for plant performance. *Mol. Plant-Microbe Interactions*, 27: 349-363.
- Bearden B.N. and Petersen L., 2000. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol. *Plant Soil*, 218: 173-183.
- Bellucci M., Pupilli F. and Arcioni S. 1999. Variation for polyphenoloxidase activity in *syms medicago* species. *Agronomie*, 19: 73-77.
- Bencke-Malato C.C., Beatriz W-S., Lauro B.N., Marina B.O., Milena S.H., Andreia C., Turchetto-Zolet, Estefania M., Mayra C.C.G.D.C, Renata S., Ricardo L.M.W., Gastón W., Atilio P.C., Ricardo V.A., Francismar C M.G., Márcia Margis-P. and Maria H B-Z., 2014. Genome-wide annotation of the soybean WRKY family and functional characterization of genes involved in response to *Phakopsora pachyrhizi* infection. *BMC Plant Biology*, 14(1): 1-18.
- Benhamou S., 1996. No evidence for cognitive mapping in rats. *Animal Behaviour*, 52 (1): 201–212.
- Benhamou N., Rey P., 2012. Stimulateurs des défenses naturelles des plantes: une nouvelle stratégie phytosanitaire dans un contexte d'écoproduction durable. Intérêt des SDN en protection des cultures. *Phytoprotection* , 92: 24-35.
- Bennett M., Gallagher M., Fagg J., Bestwick C., Paul T., Beale M. and Mansfield J., 1996. The hypersensitive reaction, membrane damage and accumulation of autofluorescent phenolics in lettuce cells challenged by *Bremia lactucae*. *Plant J.* 9 : 851-865.
- Bernard R.L. & Weiss M.G., 1973. Qualitative Genetics soybeans, production and uses. In: Couldwel B.E. (ed). *Agronomy sevies, American Society of Agronomy*. Madison Wisconsin; USA: 117-154.
- Birhane E., Kuyper T.W., Sterck F.J. and Bongers F., 2010. Arbuscular mycorrhizal associations in *Boswellia papyrifera* (frankincense-tree) dominated dry deciduous woodlands of Northern Ethiopia. *For.Ecol.Manag.*, 260: 2160-2169.
- Bivoko D.R., Ahonzo-Niamke S.L., Zeze A., 2013. Impact des propriétés physicochimiques des sols de culture du manioc sur l'abondance et la diversité des communautés de champignons mycorrhiziens à arbuscules dans la zone agroécologique d'Azaguie, sud-est de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 25(3): 251-264.
- Blum M.M.C., Reis E.M.; Franciei T.V., Carlini R., 2015. *In vitro* effect of substrate, temperature and photoperiod on *Phakopsora pachyrhizi* urediniospore germination and germ tube growth. *Summa Phytopathologica*, 41(2):101-106.

- Boivin-Masson C., Bontemps C., Golfier G., Gris-Liebe C., Talini L., 2006. Détection et typage du gène nodC à l'aide de biopuce à ADN : perspectives pour l'étude de la diversité et de l'écologie moléculaire des Rhizobia. Les actes du BRG., 6 : 97-110.
- Boller T., 1988. Ethylene and regulation of antifungal hydrolases in plants. In: Miflin B. J. (Eds): Oxford. Surveys of plant molecular and cell biology. Oxford University Press, Oxford, 5: 145-174.
- Bonde M.R., Nester S.E., Morre W.F., Allen T.W., 2009. Comparative susceptibility of kudzu accessions from the southeastern United States to infection by *Phakopsora pachyrhizi*. *Plant Dis.*, 93: 593–598.
- Bonde M.R. & Brown M.F., 1980. Morphological comparison of isolates of *Phakopsora pachyrhizi* from different areas of the world. *Can. J. Microbiol.* 26: 1443-1449.
- Bonde M.R., Nester N.E., Austin C.N., Stone C.L., Frederick R.D., Hartman G.L. & Miles M.R., 2006. Evaluation of virulence of *Phakopsora pachyrhizi* and *P.meibomiae* isolates. *plant Dis.*, 90: 708-716
- Bonfante P., Perotto S., 1995. Strategies of arbuscular mycorrhizal fungi when infecting host plants. *New Phytologist*, 130: 3–21.
- Boudjeko T., Djocgoue P.F., Nankeu J.D., Mbouobda H.D., Omokolo D.N. et EL H.I., 2007. Luteolin derivatives and heritability of resistance in the *Theobroma cacao* L.(Cacao)/*Phytophthora megakarya* Bra and Griff interaction. *Australian Plant Pathology*, 36: 56-61.
- Berrada H. & Benbrahim K., 2014. *Taxonomy of the rhizobia* : current perspectives. *British Microbiology Research J.*, 4(6) : 616-639.
- Boyle M. and Paul E.A., 1988. Vesicular-arbuscular Mycorrhizal associations with barley on sewage-amended plots. *Soil Biol.Biochem.*, 20: 945-948.
- Bradford M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annals of Biochem.*, 72: 248-254.
- Bromfield K.R., 1984. Soybean Rust. *American Phytopathological Society*, St. Paul, MN. 65 p.
- Bruno S. & Christine M., 2011. Fondements de la protection des cultures. PIP c/o COLEACP, Bruxelles, 294 p.
- Bruckert E & Rosenbaum D., 2011. Lowering LDL-cholesterol through diet: potential role in the statin era. *Curr Opin Lipidol*, 22: 43-48.
- Brundrett M.C., Bougher N.D., Grove B.T. & Malajczuk N., 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. *ACIAR Monograph*. 32. 374 P.
- Burdon J.J., 1988. Major gene resistance to *Phakopsora pachyrhizi* in *Glycine canescens*, a wild relative of soybean. *Theoretical and Appl Genet.*, 75: 923–928.
- Burdon J.J., Speer S.S., 1984. A set of differential *Glycine* hosts for the identification of races of *Phakopsora pachyrhizi* Syd.*Euphytica*, 33: 891–896.
- Buwalda J.G., Stribley D.P. and Tinker P.B., 1983. Increased uptake of Bromide and Chloride by plants infected with VA Mycorrhizas. *New Phytol.* 93: 217-225.

- Camps C., Michel V., Martinez C., 2012. Souche de *Lactobacillus* utilisée comme agent de lutte biologique contre *Pythium ultimum* sur tomate. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 44 (6): 344–348
- Campos-Soriano L., José García-Martínez and Blanca S.S., 2011. The arbuscular mycorrhizal symbiosis promotes the systemic induction of regulatory defence-related genes in rice leaves and confers resistance to pathogen infection. *Mol. Plant Pathol.*, 1-14
- Caviness C.E., 1966. Estimates of natural cross pollination in Jackson soybeans. *Arkansas Crop Sci.* 6: 21 p.
- Chandra S.H.B., 2012. *Isolation and characterization of soybean (Glycine max) lectin*. Thesis, submitted to national institute of technology, Roukela, 43 p.
- Charles E.S., Jules Patrice N.D., Alain H., William K.T., Dorothée M.N., Patrice Z.N., Godwill C. and Zachee A., 2021. Efficacy of Methanolic and Aqueous Extracts of *Thevetia peruviana* (pers.) K. Schum on Growth of *Phytophthora colocasiae* Racib, Causal Agent of Taro Late Blight in Cameroon *J. of Applied Life Sci. Int.* 24(4): 44-54
- Catherine N.J.J.D., Murray C., Ridout J., 2017. Trade-Offs in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis: Disease Resistance, Growth Responses and Perspectives for Crop Breeding. *Agronomy*, 7 (75): 1-18.
- Charles Essome Salel, Jules Patrice Ngoh Dooh, Alain Heu, William Kuate Tueguem, Dorothée Mvondo Nganti, Patrice Zemko Ngatsi, Godwill Chewachong and Zachee Ambang, 2021. Efficacy of Methanolic and Aqueous Extracts of *Thevetia peruviana* (pers.) K. Schum on Growth of *Phytophthora colocasiae* Racib, Causal Agent of Taro Late Blight in Cameroon. *J. A. L. Sci. Int.*, 24(4): 44-54.
- Chavan S.S., Shinde D.A. and Kadam A.M., 2018. Screening of soybean genotypes against. *Colletotrichum*. *J. of pharmacognosy. and phytochemistry*, 1: 2972-2974.
- Chatenet C., 2007. Le soja, une plante étonnante, un aliment incontournable. *Actualités pharmaceutiques* (469), p.37
- Chapman., Hall., 1973. *Phytochemicals Methods. A guide to modern technique of plant analysis*. Harbone J.B., London, Pp.192-195
- Chen Q., Wu W.W., Qi S.S., Cheng H., Li Q., Ran Q., Dai Z.C., Egan S., Thomas T. and Du D.L., 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth and disease resistance of the invasive plant *Wedelia trilobata*. *J. of Appl Microbiology*: 1-10.
- Cheng Y.H. et Tu C.C., 1986. Effects of Vesiculararbuscular mycorrhiza on the absorption of Phosphorus. Growth and yield in corn and soybean. *Tainan Dist. Agr. Impro. Sta. Bull.* (20): 39-52.
- Chisholm S.T., Coaker G., Day B., Staskawicz B.J., 2006. Host-microbe interactions: shaping the evolution of the plant immune response. *Cell.* 124:803–14.
- Cooke D., Cano L.M., Raffaele S., Bain R.A., Cooke L.R., Etherington G.J., Deahl K.L., Birch P.R.J., Lees A.K. & Kamoun S., 2012. Genome analyses of an aggressive and invasive lineage of the Irish potato famine pathogen. *PLOS Pathogens*, 8(10): 2929-2940.
- Collomb V. & Mayor Mélanie., 2007. Le soja, la reine des légumineuses *H.E.D.S. F.D* :1- 4.
- Comandini O., Contu M., Rinaldi A.C., 2006. An overview of *Cistus* ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 16: 381–395.

- Constabel P.C., Yip L., Patton J.J. and Christopher M.E., 2000. Polyphénols oxidase from hybrid Poplar. Cloning and expression in response to wounding and herbivory. *Plant Physiol.* 124: 285-295.
- Dalia G.A., Younes M.R. & Saad M.H., 2019. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Trigger Transcriptional Expression of Flavonoid and Chlorogenic Acid Biosynthetic Pathways Genes in Tomato against Tomato Mosaic *Virus.scientific peports*, 1-10.
- Ddamulira G., Mukankusi C., Ochwo-Ssemakula M., Edema R., Sseruwagi P., Gepts P., 2014. Distribution and Variability of *Pseudocercospora griseola* in Uganda. *J. of Agricultural Sci.*, 6 (6): 16–29.
- De Lorenzo G. and Cervone F., 1997. Polygalacturonase-inhibiting proteins (PGIPs): Their role in specificity and defense against patho-genic fungi. In: G. Stacey and Keen N.T. (eds). *Plant-Microbe Interactions*. Chapman & Hall, New York:76-93
- Derli D. & Eduardo C., 1990. Changement technique et développement économique: cas de la culture du soja au Brésil, PP.1-6.
- Diego D., Jennifer M., Fernando E., Gustavo E and Winston Q., 2018. Isoflavonoid composition and biological activity of extracts from soybean seedlings treated by different elicitors. *Annals of the Brazilian Acad.of Sci.*, 90 (2): 1955-1971.
- Diop T.A., Plenchette C. and Strullu D.G., 1994. In vitro culture of sheared Mycorrhizal roots. *Symbiosis*, 17: 217-227.
- Diop I., Kane A., Krasova-Wade T., Sanon K.B., Hounngandan P., Neyra M., Noba K., 2013. Impacts des conditions pédoclimatiques et du mode cultural sur la réponse du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp.) à l'inoculation endomycorhizienne avec *Rhizophagus irregularis*. *Journal of Applied Biosciences*, 69: 5465-5474.
- Dixon R.A., Dey P.M. and Lamb C.J., 1983. Phytoalexins: enzymology and molecular biology. *Adv. in enzym. and related areas of mol. Biol.* 55: 1-135.
- Djeugap F.J., Mefire M.H., Nguefack J., Nguenguim M., Fontem D.A., 2014. Effet variétal et du traitement fongicide sur la sévérité de la maladie des taches angulaires et le rendement du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) à l'Ouest-Cameroun. *Int. J. of Biology and Chemistry Sci.*, 8 (3): 1221-1233.
- Djiana R., Berthe T., Burel C., Schaumann A., Bruyant P.and Balange A.P., 1996. Partial purification and characterization of basic peroxydases from cell culture medium. *Plant Physiol. Biochem.*, 34 (6): 771-778.
- Djocgoue P.F., 1998. Analyse des variations biochimiques liées au développement et à l'infection par *Phytophthora megakarya* Bra. et Grif. chez *Theobroma cacao* L. Thèse Doct. 3 ème cycle, Univ. Yaoundé I (Cameroun). 112 P.
- Djocgoué P.F., Mbouobda H.D., Boudjeko T., Effa O.P., Omokolo N.D., 2011. Amino acids, carbohydrates and heritability of resistance in the *Theobroma cacao/Phytophthora megakarya* interaction. *Phytopathologia Mediterranea*, 50: 370-383.
- Dongmo N.A., Nguefack J., Fouelefack F.R., Dakolé D.C., Kuate T.W.N., Nkengfack A.E.and Dongmo L.J.B., 2020. Effect of essential oil and powders of *Tithonia diversifolia* on the growth parameters and yield of rice in the field. *Int.J.Curr. Res. Biosci. plant.* 7(1): 33-45
- Doré C. & Varoquaux F., 2006. Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées. Paris: institut national de la recherche agronomique. De l'aliment au complément alimentaire,

- les miracles du soja. Alpen Editions, 840p.
- Dorff E., 2007. Le soja, la culture «bonne à tout faire» de l'agriculture, gagne du terrain dans tous le Canada. In Un coup d'œil sur l'agriculture canadienne au catalogue de Statistique Canada. [En ligne] <http://www.statcan.gc.ca/pub/96-325-x/2007000/article/10369-fra.pdf> (Page consultée le 14 decembre 2021).
- Dorrance A., Hershman D. et Draper M., 2007. Economic importance of Soybean Rust. Dans : Using foliar fungicides to manage soybean rust. Land Grant Universities Cooperating NCERA-208 et OMAF, Etats-Unis. Pp. 11-19
- Duan C.H., Riley M.B. & Jeffers S.N., 2008. Characterization of *Phytophthora cinnamomi* populations from ornamental plants in South Carolina, USA. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 41(1): 14-30.
- Duhoux E., Nicole M., 2004. Biologie végétale. Associations et interaction chez les plantes. Edition DUNOD. Paris. France, pp 1- 20
- Ebanga M., Moujouopou M., Sipa A., Delavet G., Bikay L. et Edibi N., 1982. Physiques Terminales C.D. E. Programme Camerounais. Les Classiques Africaines.
- EL Oirdi M., Abd E.R., Rigano T., El H.L., Rodriguez A., 2011. *Botrytis cinerea* manipulates the antagonist effects between immune pathways to promote disease development in tomato. *The Plant Cell*. 23: 2405-2421
- El Mnouchi S., 2015. Le rôle des microRNAs dans la mise en place de la maladie chez les plantes. *Thèse de doctorat*. Université de Sherbrooke, Canada. 176 p.
- Frederick R.D., Snyder C.L., Peterson G.L., Bonde M.R., 2002. Polymerase chain reaction assays for the detection and discrimination of the soybean rust pathogens *Phakopsora pachyrhizi* and *P. meibomia*. *Phytopathology*, 92: 217–227.
- Fritig B., Heitz T. & Legrand M., 1998 Antimicrobial proteins in induced plant defence. *Curr Opin Immunol* 10: 16-22.
- Furtado G.Q., Alve S.A.M., Czermainski A.B.C. & Massola Jr.N.S., 2008. Preservation of *Phakopsora pachyrhizi* Uredospores. *J. Phytopathology*. 156:62–64
- Garbaye J., 1988. Growth response of eucalyptus in the Congo to ectomycorrhizal inoculation. *Forest Ecology and management*. 24:151-157.
- Garcia A., Calvo E.S., de Souza K.R.A., Harada A., Hiromoto D.M., Vieira L.G., 2008. Molecular mapping of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) resistance genes: discovery of a novel locus and alleles. *Theor Appl Genet*. 117: 545–553.
- Garner W.W. & Allard H.A., 1923. Effect of the relative length of day and night and other factors of the environment on growth and reproduction of plant. *J. Agric. Res.* 18: 553-606.
- Gaspar T., Kevers C., Hausman J.F., Penel C., Jouve L., Martin-Tanguy J., Ariband M. and Greppin H., 1996. Peroxidase as an indissociable factors of auxin and polyamine metabolism in the induction of rooting and flowering. In: Obinger C., Burner U., Ebermann R., Penel C., Greppin H., (Eds). *Plant peroxidases: Biochemistry and Physiology*. Univ. Geneve. Pp. 226-234.
- Gerdman J.W. and Nicolson T.H., 1963. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans Br Mycol Soc.*, 46: 235–244.

- Gerdemann J.W. et Trappe J.M., 1974. Endogonaceae in the Pacific Northwest. *Mycologia Mem.*, 5:1-76.
- Goellner K., Loehrer M., Langenbach C., Conrath U., Koch E., Schaffrath U., 2010. *Phakopsora pachyrhizi*, the causal agent of Asian soybean rust. *Mol. Plant Pathol.*, 11(2): 169-77.
- Govindarajulu M., Pfeffer P.E., Jin H., Abubaker J.D.D.D., Allen J.W., Bucking H., Lammers P.J. And Shachar-Hill Y., 2005. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nature*, 435 (7043): 819-23.
- Godoy C., Koga L.J., Canteri M.G., 2006. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. *Fitopatologia Brasileira*, 31: 063-068.
- Gnamkoulamba A., Tounou A.K., Tchao M., Tchabi A., Adjevi A.K.M., Batawila K., 2018. Evaluation au champ du potentiel de croissance et de la production du riz (*Oryza Sativa* L.) variété IR841 inoculé en pépinière par quatre souches de champignons mycorrhiziens à arbuscules 14 (6) : 1857 – 7881.
- Grant C., Bittman S., Montreal M., Plenchette C. and Morel C., 2005. Soil and Fertilizer Phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Can. J. Iant. Sci.*, 85: 3-14.
- Greenberg J.T., 1997. Programme cell death in plant-pathogen interactions. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48: 525-545.
- Guy R., 2012. Le soja ou soya : aliment-santé durable. Soja non og [http:// www.infogm. Org / spip . php?article3231](http://www.infogm.Org/spip.php?article3231)
- Haesslein D., Oreiller, 2008. La boisson au soja, est-ce pour moi? *Hes.SO//Genève*:1-7.
- Hahlbrock K. and Scheel D. 1989. Physiology and molecular biology of phenylpropanoïd metabolism. *Ann Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 40: 347-369.
- Hamel D. and Planchette C., 2007. Mycorrhizae in crop production. Street, Binghamton, NY, Haworth and agricultural product press, New York 326 p.
- Harley J.L., 1989. The significance of mycorrhiza. The fourth benefactors' lecture. *Mycol. Res.* 92 (2): 129-139.
- Haro H. 2011. Effet d'inoculum de champignons mycorrhiziens arbusculaires sur la productivité du niébé *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), Université de Ouagadougou, 94 p.
- Haro H., Sanon K.B., Diop I., Kane A., Dianda M., Houngnandan P., Neyra M., Traoré A., 2012. Réponse à l'inoculation mycorrhizienne de quatre variétés de niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] Cultivées au Burkina Faso et au Sénégal. *Int. J. of Biol. and Chem. Sci.*, 6(5): 2097-2112.
- Haro H., Sanon K.B., Le Roux C., Duponnois R., Traoré A.S., 2017. Improvement of cowpea productivity by rhizobial and mycorrhizal inoculation in Burkina Faso. *Symbiosis*: 1-14.
- Hadou H., Kadidia B.S., 2020. Réponse du sésame (*Sesamum indicum* L.) à l'inoculation mycorrhizienne avec des souches des champignons mycorrhiziens arbusculaires indigènes du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 14(2): 417-423.
- Hartman G.L., Miles M.R. and Frederick R.D., 2005. Breeding for resistance to soybean rust. *Plant Dis.*, 89: 664-666.

- Hartman G.L., Hill C.B., Twizeyimana M., Miles M.R. and Bandyopadhyay R., 2011. Interaction of soybean and *Phakopsora pachyrhizi*, the cause of soybean rust. *CAB Int.* 25(6):1749-8848
- Heath M.C. and Stumpf M.A., 1986. Ultrastructural observations of penetration sites of the cowpea rust fungus in untreated and silicon-depleted French bean cells. *Physiol. and Mol. Plant Pathol.*, 29: 27-39.
- Heath M.C., 1972. Ultrastructure of host reactions to cowpea rust. *Phytopathology*, 62: 27-38.
- Herre E.A., Mej L.C., Kylo D.A., Rojas E., Maynard Z., Butler A., van Bael S.A., 2007. Ecological implications of anti-pathogen effects of tropical fungal endophytes and mycorrhizae. *Ecology*. 88: 550–558.
- Hibbett D.S., Manfred B., Bischoff J.F., Meredith B., Cannon P.F., Sabine H., Timothy J., Kirk P.M., 2007. A higher-level phylogenetic classification of the *Fungi*. *Mycological Research*, 111(5): 509-547
- Hildebrandt U., Regvar M., Bothe H., 2007. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry* 68: 139-146.
- Hodge A., Campbell C.D., Fitter A.H., 2001. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature* 413: 297–299.
- Houngnandan P., Yemadje R.G.H., Kane A., Boeckx P., Van Cleemput O., 2009. Le glomales indigènes de la forêt claire à *Isoperlinia doka* Craibet Stapf à WariMaro au centre du Bénin. *Tropicultura*, 27(2): 83-87.
- Hymowitz T., 1970. On the domestication of the soybean. *Economic Botany*, 24, 408–421.
- Igarashi W.T., Mayra S.I., Gustavo M. de Oliveira, Otavio J.G. A.S. & Seiji I., 2012. Comparative morphology between uredospores of species of agricultural importance. *Brazilian J. of Appl. Tech. For Agric. Sci.*, 5(3): 89-94.
- Ingle Y.V., Chandankar G.D., Patil P.V. & Patil C.U., 2016. Evaluation of advance lines of soybean for resistance to major diseases under natural field condition. *Indian J. of Agric. Res.*, 50(1): 84-87.
- Ismail Y., Mc Cormick S. and Hijri M., 2013. The arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus irregular*, controls the mycotoxin production of *Fusarium sambucinum* in pathogenesis of potato. Yaacov Okon edition, Federation of European Microbiological societies, 6 p.
- Jacques B.B. Soybean. 2010. www.sante-vivante.fr 1/21
- Janouskova M., Pavlikova D. & Vosatka M., 2006. Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. *Chemosphere*. 65: 1959-1965.
- Jarosz A.M., Burdon J.J., 1990. Predominance of a single major gene for resistance to *Phakopsora pachyrhizi* in a population of *Glycine argyrea*. *Heredity*, 64: 347–353.
- Joanna C.P., Colin S. and Paul B.G., 1999. Changes in the location of polyphenol oxidase in potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber during death in response to impact injury: comparison with tissue. *Planta*, 207: 449-460.
- Johnson N.C. et Pflieger F.L., 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizal and cultural stresses. In: G.J. Bethlenfalvay and R.G. Linderman (Eds). *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*, ASA Special Publication No; 54, Madison, WI., PP 71-99

- Johnson J-M., Houngnandan p., Kane A., Sanon K., Neyra M., 2013. Diversity patterns of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi associated with rhizosphere of cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) in Benin, West Africa. *Pedobiol.Int.J.soil Biol.*, 56: 121-128.
- Joner E.J. et Leyval C., 2003. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza. *Env. Sci. & Tech.*, 37: 2371-2375.
- Josserant M., 1983. La description des champignons supérieurs. Le chevalier, France, 392 p.
- Mbogne T.J., Temegne N.C., Houngnandan P., Youmbi E., Tonfack L.B., Ntsomboh-Ntsefong G., 2015. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi of pumpkins (*Cucurbita* spp.) under the influence of fertilizers in ferralitic soils of Cameroon and Benin. *J. App. Biol. Biotech.*, 3 (05): 001-010.
- Jung S.C., Martinez-Medina A., Lopez-Raez J.A. and Pozo M.J., 2012. Myorrhiza-induced Resistance and Priming of plant defenses. *J. of chem. Ecol.*, 38: 651-664.
- Kaltenbach E.H., Kiefer E., Grosskopf E., Ernst D., Sandermann H.J., 1997. Differential transcript induction of parsley pathogenesis-related proteins and of a small heat shock protein by ozone and heat shock. *Plant Mol Biol.*, 33:343–350
- Katz V.A., Thulke O.U. and Conrath U., 1998. A benzothiadiazole primes parsley cell for augmented elicitation of defense responses. *Plant Physiol.*, 117 : 1333-1339.
- Kauffmann S., Dorey S. et Fritig B., 2001. Les stratégies de défense. Pour la Science, 116–121.
- Kauffmann S., Legrand M., Geoffroy P. & Fritig B., 1987. Biological Function of Pathogenesis Related proteins – 4 Pr proteins of Tobacco Have 1,3-Beta-Glucanase Activity. *Embo J.*, 6: 3209-3212.
- Kahiluoto H., Ketoja E., Vestberg M., Saarela I., 2001. Promotion of AM utilization through reduced P fertilization. 2. Field studies. *Plant Soil*, 231: 65–79.
- Keen N.T., 1979. The possible association of phytoalexins with resistance expression in flax to *Melampsora lini*. *Physiol. Plant Patbol.*, 14: 265-280.
- Kerby K. and Sommerville S.C., 1992. Purification of an infection-related extracellular peroxidase from barley. *Plant Physiol.* 100: 397-402.
- Kerroum F., 2019. Identification et caractérisation du *Phytophthora infestans* agent pathogène du mildiou de la pomme de terre et essai de lutte biologique. Thèse de Doctorat. Université d'Oran1 'Ahmed Ben Bella'. 132 p.
- Keli J.Z., Obouayeba S. & Zehi B., 1990. Perspectives de stabilisation des systèmes de cultures à base d'hévéa en basse Côte d'Ivoire. In: Défis de la stabilisation des systèmes traditionnels de cultures en Côte d'Ivoire. Actes du troisième atelier OFRIC du 21 au 23 juin, Bouaké, Côte d'Ivoire, 52-57.
- Klarzynski O. et Fritig B., 2001. Stimulation des défenses naturelles des plantes. C. R. Acad.Sci. Paris, Sciences de la vie, 324: 953–963
- Kim S.H., Shinkle J.R. and Roux S.J., 1989. Phytochrome induces changes in immunodetectable level of a wall peroxidase that precede growth changes in maize seedlings. *Proc. Natl.Acad. Sci. USA*, 86: 9866-9870.

- Klironomos J.N., Moutoglis P., Kendrick B.W. and Widden P., 1993. A comparison of spatial heterogeneity of VAM fungi in two maple-forest soils. *Can J. of Botanic*, 71: 1472-1480.
- Koch E., Ebrahim N.F., and Hoppe H.H., 1983. Light and electron microscopic studies on the development of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Syd) in susceptible soybean leaves. *Phytopathol.*, 106:302-320.
- Kumudini S., Godoy C.V., Board J.E., Omielan J. & Tolleraar M., 2008. Mechanism involved in soybean rust induced yield reduction. *Crop Sci.* 48: 2334-2342.
- Kramling T.E.S.V.L., 1969. An estimation of the nonflavonoid phenols in wines. *American journal of Enology and Viticulture*, 20(2): 86-92
- Labat, 2013. Le soja : influence de sa consommation sur la santé humaine et conséquences de l'expansion de sa culture au niveau mondial, 104 p.
- La Camera S., Gouzerh G., Dhondt S., Hoffmann L., Fritig B., Legrand M. and Thierry H., 2004. Metabolic reprogramming in plant innate immunity: the contributions of phenylpropanoid and oxylipin pathways. *Immunol. Rev.*, 198: 267–284.
- Lance G. & Garren B., 2005. Origin history and uses of soybean (*Glycine max*). 2 p.
- Leath K.T. and Rowell J.B., 1966. Histological study of the resistance of *Zea mays* to *Puccinia graminis*. *Phytopathology*, 56: 1305-1309.
- Leath K.T. and Rowell J.B., 1969. Thickening of corn mesophyll cell walls in response to invasion by *Puccinia graminis*. *Phytopathology*, 59: 1654-1656.
- Leath K.T and Rowell J.B., 1970. Nutritional factors in the resistance of *Zea mays* to *Puccinia graminis*. *Phytopathology*, 60: 1097-1100.
- Leelasuphakul, 2006. Purification, characterization and synergistic activity of beta-1,3glucanase and antibiotic extract from an antagonistic bacillus subtilis against rice blast and sheath blight. *Enzyme and Microbial Technology*, 38: 990-997
- Legendre L. et Legendre P., 1984. Ecologie numérique. La structure des données écologiques. Paris / Québec. Masson/ Puq 197 p.
- Legrand M., Kauffmann S., Geoffroy P. & Fritig B., 1987. Biological function of pathogenesis related proteins- 4 Tobacco Pathogenesis-relatedproteins Are Chitinases. *Proc Natl Acad Sci USA*, 84: 6750-6754.
- Leslie-Dolorès R.B., Howell B.H, Appolinaire A., Charlotte Z, Pascal H., 2019. Diversité des champignons mycorrhiziens arbusculaires associés à la culture du maïs (*Zea mays* L.) au Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 13(2): 597-609
- Le Tacon F., 1985. Les Mycorhizes : une coopération entre plantes et champignons. La recherche n°166, pp. 624–632.
- Levy C., 2005. Epidemiology and chemical control of soybean rust in southern Africa. *Plant Dis.* 89 : 669-674.
- Lichtenthaler H.K. and Schweiger J. 1998. Cell wall bound ferulic acid, the major substance of the blue-green fluorescence emission of plants. *J. Plant Physiol.* 152: 272-282.
- Li S., Smith J.R., Ray J.D., Frederick R.D., 2012. Identification of a new soybean rust resistance gene in PI 567102B. *Theor Appl Genet*, 125(1): 133–142.

- Li F., Guo Y., Christensen M.J., Gao P., Li Y. and Duan T., 2017. An arbuscular mycorrhizal fungus and *Epichloe festucae* var. *lolii* reduce *Bipolaris sorokiniana* disease incidence and improve perennial ryegrass growth. *Mycorrhiza*, 28: 1–11.
- Linderman R.G., 1994. Role of VAM in biocontrol. In: Pflieger, F.L., Linderman, R.G. (Eds.), *Mycorrhizae and Plant Health*. APS Press, St. Paul, NM, USA, pp. 1–26.
- Liu J., Maldonado-Mendoza I., Lopez-Meyer M., Cheung F., Town C.D., Harrison M.J., 2007. Arbuscular mycorrhizal symbiosis is accompanied by local and systemic alterations in gene expression and an increase in disease resistance in the shoots. *Plant J.*, 50: 529–544.
- Luck J., Spackman M., Freeman A., Trębicki P., Griffiths W., Finlay K., Chakraborty S., 2011. Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathol.*, 60: 113-121.
- Lygin A.V., Li S., Vittal R., Widholm J.M., Hartman G.L., and Lozovaya V.V., 2009. The importance of phenolic metabolism to limit the growth of *Phakopsora pachyrhizi*. *Phytopathology*, 99: 1412–1420.
- Macheix J.J., Fleuriot A. and Billot J. 1990. Fruit phenolics. CRC Press, Boca Raton, FL. 378p.
- Mahesha B, Patil PV .2007. Evaluation of soybean genotypes for multiple disease resistance. *Soy. Res.*, 5: 75-79.
- Mahesha B., Patil P.V. and Nandini B., 2009. Identification of multiple disease resistance sources in soybean. *Crop Res.*, 37: 213-216.
- Marchetti M.A., Melching J.S. and Bromfield K.R., 1976. The effects of temperature and dew period on germination and infection by uredospores of *Phakopsora pachyrhizi*. *Phytopathology*, 66: 461-463.
- Marigo G., 1973. On one fractioning methods and estimations of phenolic compounds in the vegetables. *Analyses*, 2: 106-110.
- Mauch F., Mauch-Mani B. and Boller T., 1988. Antifungal hydrolases in pea tissues. *Plant Physiol.* 88 : 936-942.
- Mayama S., Matsuura Y., Iida H. and Tani T., 1982. The role of avenalumin in the resistance of oat to crown rust, *Puccinia coronata* f.sp . *avenae*. *Physiol. Plant Pathol.*, 20: 189-199.
- Mboussi S.B., Ambang Z., Ndogho P., Ngho Dooh J.P. and Manga E.F., 2016. In vitro antifungal potential of aqueous seeds extracts of *Azadirachta indica* and *Thevetia peruviana* against *Phytophthora megakarya* in Cameroon. *J. of Appl. Life Sci. Int.*, 4 (4): 1-12.
- McLusky S.R., Bennet M., Beale M.H., Lewis M.J., Gaskin P. and Mansfield J.W., 1999. Cell wall alteration and localized accumulation of feruloyl-3'-methoxytyramine in onion epidermis at site of attempted penetration by *Botrytis allii* are associated with actin polarisation, peroxidase activity and suppression of flavonoid biosynthesis. *Plant J.*, 17: 523-534.
- Menendez A.B., Scervino J.M., Godeas A.M., 2001. Arbuscular mycorrhizal populations associated with natural and cultivated vegetation on a site of Buenos Aires province, Argentina. *Biol. Fertil. Soil*, 33: 373–381.
- Messner B. and Boll M., 1993. Elicitor-mediated induction of enzymes of lignin biosynthesis and formation of lignin-like material in a suspension culture of spruce (*Picea abies*). *Plant Cell Tiss. Org. Cult.*, 34 : 261– 269.

- Meteignier L.V., 2015. Investigation sur la régulation traditionnelle pendant la réponse immunitaire végétale par les protéines NB-LRR, *Thèse de doctorat*, Université de Sherbrooke, Canada, 277p
- Mikola P., 1988. Ectendomycorrhiza of conifers. *Silvia Fennica*, 22: 19-27.
- Miles M.R., Hartman G.L., Levy C. and Morel W., 2003. Current status of soybean rust control by fungicides. *Pesticide Outlook*, 14(5): 197-200.
- Miles M.R., Frédérick R.D., Hartman G.L., 2006. Evaluation of soybean germplasm for resistance to *phakopsora pachyrhizi*. *Plant Health Prog.* online. doi:10.1094/PHP-2006-0104-01-RS
- Miles M.R., Levy C., Morel W., Mueller T., Steinlage T., van Rij N., Frederick R.D. et Hartman G.L., 2007. International fungicide efficacy trials for the management of soybean rust. *Plant Dis.*, 91: 1450-1458
- Miles M.R., Pastor-Corrales M.A, Hartman G.L., Frederick R.D., 2007. Differential response of common bean cultivars to *Phakopsora pachyrhizi*. *Plant Disease*, 91: 698–704.
- Millen M.C., Juniper S. and Abbott L., 1998. Inhibition of hyphal growth of VAM containing sodium chloride of infection from fungus in soils limits the spread spores. *Soil Biol. Biochem.*, 30 (13): 1639-1646.
- Mohan R. and Kolattukudy P.E., 1990. Differential activation of expression of a suberization-associated anionic peroxidase gene in near isogenic resistant and susceptible tomato lines by elicitors of *Verticillium albo-atrum*. *Plant Physiol.* 92: 276-280.
- Molina R., Massicotte H., Trappe J.M., 1992. Specificity phenomena in mycorrhizal symbioses: community-ecological consequences and practical implications. In: Allen MF, (eds). *Mycorrhizal Functioning: an Integrative Plant-Fungal Process*. New York: Chapman and Hall, pp. 357-423.
- Morandi D., 1989. Effect of xenobiotics on endomycorrhizal infection and phytoalexin accumulation in soybean roots. *Plants Physiology and Biochemical*, 27 (5): 697-701.
- Morton J.B. and Redecker D., 2001. Two new families of Glomales, *Archaeosporaceae* and *Paraglomaceae*, with two new genera *Archaeospora* and *Paraglomus*, based on concordant molecular and morphological characters. *Mycologia*, 93: 181-195
- Mousain D., Bonnin C., Mauré L., Scheromm P., El Karkouri K., Cleyet-Marel J.C., Argillier C. & Sardin T., 1996. A strategy for quality improvement of forest seedlings and Mediterranean reforestation by means of controlled mycorrhizal infection in nurseries. *Bocconea*, 5: 375-387
- Mousain D., 1991. Ectomycorrhization et tolérance des arbres à la sécheresse: Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides. Groupe d'Etude de l'Arbre, Ed. John Libbey Eurotext, Paris. pp 167-174.
- Mueller T.A., Miles M.R., Morel W., Marois J.J., Wright D.L., Kemerait R.C., Levy C. et Hartman G.L., 2009. Effect of fungicide and timing of application on soybean rust severity and yield. *Plant Dis.* 93: 243-248
- Murithi M.H., Haudenschild S.J., Beed .F., Mahuki G., Joosten J.A.H.M. & Hartman L.G., 2017. Virulence diversity of *phakopsora pachyrhizi* isolates from east Africa compared to a geographically diversity collection. *plant Dis.*, 101:1194-1200
- Ndogho P.A., Ambang Z., Makamté P.E..D., Tchadjoko N.R., Gbaporo G.F.C., Mvondo N. D., Koné N.N.A., 2018. Effect of aqueous extracts of neem seeds (*Azadirachta indica*)

- on the development of Asian Rust of soybean in the Center Region of Cameroon. *I.J.E.A.B.*, 3(3): 956-964.
- Nelsen C.E. and Safir G.R., 1982. Increased drought tolerance of mycorrhizal onion plants caused by improved phosphorus nutrition. *Planta*, 154: 407- 417
- Ngoh Doo N.J.P., Ambang Z., Ndongo B., Heu A. et Tueguem K.W., 2014a. Effect of *Thevetia peruviana* (pers) K. Schum. On development of *Phytophthora megakarya* causal agent of black pod disease of cocoa. *J. Appl. Biosci.*, 77: 6564-6574.
- Ngonkeu M.E.L., Nwaga D., Adamou S., Fokom R., Tchameni N.S., Onguene N.A., Nana W.L., Chaintreuil C., The C., Amougou A., Moulin L., Prin Y., Lebrun M., Dreyfus B. 2013. Diversité des champignons mycorrhiziens arbusculaires du Cameroun. Marseille. pp 141-157
- N'goran K.E., Kassin K.E., Zohouri G.P., N'gbesso M.F.P. & Yoro G.R., 2011. Performances agronomiques des associations culturales igname-légumineuses alimentaires dans le Centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *J. Appl. Biosci.* 43: 2915–2923
- Ngueguim M., Mekontchou T., Fobasso M., Nounamo L., 2011. Influence of time of planting on yield and grain quality of bean genotypes grown on an andosol in the Western Highlands of Cameroun. *Afri. Crop Sci. J.*, 19 (4): 247-254.
- Noel., 2009. Diversité génétique des Rhizobia associés à un champ de pois d'angole (cajanus cajan I) à Yamoussoukro (centre de la Cote d'Ivoire).
- Oehl F., Souza F.A., Sieverding E., 2008. Revision of *Scutellospora* and description of five new genera and three new families in the arbuscular mycorrhiza-forming *Glomeromycetes*. *Mycotaxon*, 106: 311–360.
- Oehl F., Ewald S., Javier P., Kurt I. and Gladstone Alves da S., 2011. Advances in *Glomeromycota* taxonomy and classification. *IMA Fugus*, 2(2): 91–199
- Ono Y., Buritica P., Hennen J.F., 1992. Delimitation of *Phakopsora*, *Physopella* and *Cerotelium* and their species on Leguminosae. *Mycol. Res.*, 96: 825-850
- Opik M. and Moora M., 2012. Missing nodes and links in mycorrhizal networks. *New Phytologist*, 194: 304–306
- Ouahmane L., Hafidi M., Kisa M., Boumezouch A., Thioulouse J., Duponnois R., 2006 *Lavandula* species as accompanying plants in cupressus replanting strategies: effet on plant growth, mycorrhizal soil infectivity and soil microbial catabolic diversity. *Appl. soil Ecol.*, 34:190-199.
- Oyong M., 1996. Influence de la plante- hôte lors de la colonisation et la sporulation endomycorhizienne sur des sols de la rhizosphère de *Crotalaria sp.* et *Rinorea sp.* Mémoire de Maîtrise, Université de Yaoundé I 73 p.
- Palenzuela J., Ferrol N., Boller T., Azcón-Aguilar C. and Oehl F., 2008. *Otospora bareai*, a new fungal species in the *Glomeromycetes* from a dolomitic shrub land in Sierra de Baza National Park (Granada, Spain). *Mycol.*, 100(2): 296-305.
- Pandey R.K., 1987. A farmer's primer on growing soybeans on Riceland. International rice Research institute (IRRC), Philippines. 218pp.
- Pan Z., Yang X.B., Pivonia S., Xue L., Pasken R., and Roads J., 2006. Long-term prediction of soybean rust entry into the continental United States. *Plant Dis.*, 90: 840-846.

- Pauwels J.M., van Ranst E., Verloo M. and MvondoZe A., 1992. Manuel de Laboratoire de pédologie. Publications Agricoles N° 28. Bruxelles: AGCD. 180p.
- Park S.-C., Lee J.R., Shin S.-O., Jung J.H., Lee, Y.M., Son H., Park Y., Lee, S.Y., and Hahm, K.-S., 2007. Purification and characterization of an antifungal protein, c-fkbp, from chinese cabbage. *J. Agric. Food Chem.*, 55:5277–5281.
- Pegg G.F., 1977. Glucanohydrolases of higher plants: possible defence mechanism against parasitic fungi. In: cell wall biochemistry related to specificity in host-plant pathogen interactions. Sotheim, B and Rona, J. (Eds). Pp: 305-342.
- Pelmont J., 1995. Bactéries et environnement : Adaptation physiologique. *Office des Publications Universitaires 2* : 541-572.
- Perezdeluque A., Tille S., Johnson I., Pascualpardo D., Ton J. and Cameron D.D., 2017. The interactive effects of arbuscular mycorrhiza and plant growth-promoting rhizobacteria synergistically enhance host plant defences against pathogens. *Sci Rep-UK 7*, 16409.
- Perry J.J., Staley J.T. and Lory S., 2004. Microbiologie. Edition Dunod, Paris. pp 633-635.
- Petri Nahas E., Nahas Neto J., De Luca L., Traiman P., Pontes A & Dalben I., 2004. Benefits of soy germ isoflavones in postmenopausal women with contraindication for conventional hormone replacement therapy. *Maturitas*, 48:372-380.
- Pham T.A., Miles M.R., Frédérick R.D., Hill C.D. & Hartman G.L., 2009. Differential responses of resistant soybean entries to isolates of *Phakopsora pachyrhizi*. *Plant Dis.*, 93: 224-228.
- Pirovani C.P., Carvalho H.A., Machado R.C., Gomes D.S., 2008. Protein extraction for proteome analysis from cacao leaves and meristems, organs infected by *Moniliophthora perniciosa*, the causal agent of the witches' broom disease. *Electrophoresis*, 29: 2391-2401.
- Plenchette C., Clermont-Dauphin C., Meynard J.M. et Fortin J.A., 2005. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian. J of plant Sci.*, 65: 31-40.
- Ploper D.L., 2004. Soybean rust. In: Main conclusions of the Panamerican Soybean Rust Workshop. Agroindustrial Experimental Station "Obispo Colombes". Communications section. Special publication No. 24, Tucumán, Argentina.
- Ploper D. L. and R. M Devani. 2002. Soybean rust: Main aspects of the disease and handling considerations. Soybeans in direct sowing. PP. 51-55 p
- Ponstein A.S., Bresvloemans S.A., Selabuurlage M.B., Vandenzelen P.J.M., Melchers L.S. & Cornelissen B.J.C., 1994. A Novel Pathogen – Inducible and Wound- Inducible Tobacco (*Nicotiana Tabacum*) Protein with Antifungal Activity. *Plant Physiol.*, 104:109-118.
- Pousset J., 2003. Engrais verts et fertilité des sols. 2ème Edition Agri décisions, Paris.
- Poss J.A., Pond E., Menge J.A. and Jarrel W.M., 1985. Effect of salinity on mycorrhizal onion and tomato in soil with and without additional phosphate. *Plant and Soil*, 88: 307-319.
- Pozo M.J., Jung S.C., Martínez-Medina A., López-Ráez J.A., Azcón-Aguilar C., Barea J.M., 2013. Root allies: Arbuscular mycorrhizal fungi help plants to cope with biotic stresses. In: Aroca R. eds. Progress in symbiotic endophytes, *Springer* 289–307.

- Pozo de la Hoz J., Rivero J., Azcón-Aguilar C., Urrestarazu M., Pozo M.J., 2021. Mycorrhiza-Induced Resistance against Foliar Pathogens Is Uncoupled of Nutritional Effects under Different Light Intensities. *J.Fungi*, 7: 402-417.
- Prolea, 2011. Le soja de la plante à ses utilisations. http://www.prolea.com/fileadmin/extranet/Publications/oleoproteagineux/brochures_carres/08%20-%20BR%20SOJ%200508.pdf
- Raab P. and Redecker D., 2006. Phylogeny of the Glomeromycota (arbuscular mycorrhizal fungi): recent developments and new gene markers. *Mycol.*, 98: 885–895.
- Rahman M.S., Ano T., Shoda M., 2007. Biofilm fermentation of iturin A by a recombinant strain of *Bacillus subtilis* 168. *J. Biotechnol.*, 127(3): 503-507.
- Rakotoarimanga N., Zananirina J., Ramamonjisoa D., Ramanankierana H., 2014. Lutte biologique antifongique: actinomycètes du sol rhizosphérique antagonistes de *Fusarium* isolé du fruit de tomate (*Solanum lycopersicum* L., 1753) pourri. *Afrique Sci.*, 10(3): 243-255.
- Raven. H., Evert, R. F., Eichlorn, S. E., 2000. Biologie végétale. La 6ème Edition de boeck, Paris. 944p.
- Redecker D., Morton J.B. and Bruns T.D., 2000. Molecular phylogeny of the arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus sinuosum* and *Sclerocystis coremioides*. *Mycol.*, 92: 282-285.
- Redecker D., SchüBler A., Stocking H., Stürmer S., Morton J., Walker C., 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23: 515-531
- Readhead J.F., 1980. Mycorrhiza in natural forest. In : Tropical Mycorrhiza Research (Mikola P. Eds.), Clarendon Press, Oxford. pp. 127-142.
- Renard F. et Foucart G., 2008. *Les maladies foliaires de la fin de végétation en culture de maïs*. UCL-Louvain-la-Neuve. 6 p.
- Ricardo Y.L., 2014. Modele de simulation de la patogénéicité de phakopsora pachirhizi chez phaseolus vulgaris. thèse de doctorat, Université de queretoro au Mexique 124 p
- Rienke N., Joke N., 2005. La culture du soja et d'autres légumineuses. *Agrodok* (10): 76 p.
- Rittmo C., 2010. Les Stimulateurs des Défenses Naturelles en production Végétale : Mythe ou Réalité ? *Plant.J.*, 33 : 42 p.
- Roberfroid M.B., 2000. A European consensus of scientific concepts of functional foods. *Nutrition* 16: 689-691.
- Romero I., Fuertes A., Benito M.J., Malpical J.M., Leyva A., Paz-Ares J., 1998. More than 80 R2R3-MYB regulatory genes in the genome of *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.*, 14 : 273-284.
- Rossi R.L., 2003. First report of *Phakopsora pachyrhizi*, the causal agent of soybean rust in the Provence of Misiones, Argentina. *Plant Dis.*, 87:102
- Roumet P., Rooryck S., Sartre P. & Tavaud-Pirra M., 2010. La sélection du soja en France: Quel état des lieux ? *Innovation Agronomiques*, 11: 175-186.
- Roxana L.M., Rosanna N.P., Alicia A., & Antonio I., 2016. Germination and infection of *phakopsora pachyrhizi* under simulated environment of the central area of santa fe, argentina. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia*. 32(3): 173-183

- Rupe J. and Sconyers L., 2008. Soybean Rust. *The Plant Health Instructor*.
- Ryan C.A., 1990. Protease Inhibitors in plants-Genes for Improving Defenses against Insects and Pathogens. *Annu Rev Phytopathol.*, 28: 425-449
- Sachin K., Nargund V.B. & Shamarao J., 2020. Morphological comparison of isolates of *Phakopsora pachyrhizi* from different locations of the Karnataka. *Pathobiology and Physiology* 4(2): 1-2
- Sansregret R., 2015. Étude des réponses de défenses mise en place chez la plante en réaction à la suppression de l'ARN d'interférence, *Thèse de doctorat*, Université de Sherbrooke, Canada, 200p
- Saïdou A., Kossou D., Acakpo C., Richards P., Kuyper W.T., 2012: Effects of farmers' practices of fertilizer application and land use types on subsequent maize yield and nutrient uptake in Central Benin. *Int. J. of Biol. and Chem. Sci.*, 6(1): 363-376.
- Schussler A., Schwarzott D. and Walker C., 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycol Res*, 105: 1413-1421.
- Schübler & Walker C., 2010. The Glomeromycota: A species list with new families the royal Botanic Garden, Edinburgh, 59p.
- Schilling R., 1996. L'arachide en Afrique tropicale. 15th Ed. Maisonneuve et Larose rue Victor Cousin, F 75005 PARIS, 171 p.
- Schneider K.T., van de M.M., Bancroft T.J., Braun E., Nettleton D., Nelson R.T., Frederick R.D., Baum T.J., Graham M.A., Whitham S.A., 2011. Biphasic gene expression changes elicited by *Phakopsora pachyrhizi* in soybean correlate with fungal penetration and haustoria formation. *Plant Physiol.*, 157: 355–371.
- Schofield P., Mbugua D.M., Pell A.N., 2001. Analysis of condensed tannins: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 91: 21-40
- Schübler A., Gehric H., Schwarzott D. and Walker C., 2001. Analysis of partial *Glomales* SSU rRNA gene sequences: implications for primer design and phylogeny. *Mycol. Res.*, 1: 5-15.
- Senan S., Mamadou D., Daouda D., Tschannen A., Girardin O., 2007. Performance de six cultivars de tomates *Lycopersicon esculentum* Mills. contre la jaunisse en cuillère des feuilles, le flétrissement bactérien et les 1 nématodes à galles. *Sci. Nature*, 4 (2): 123–130.
- Sieverding E., 1988. Effect of soil temperature on performance of different VA mycorrhizal isolates with cassava. *Angewandte Botanik*, 62 (6): 295-300.
- Sieverding E., 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhiza Management. In *Tropical Agrosystems*. GTZ n° 224 FRG. 281p.
- Silatsa D.M., 2006. Etude épidémiologique de la pourriture brune des cabosses de cacaoyer sous l'influence des agents de lutte biologiques. Mémoire D.E.A. université de Yaoundé I, 49 p.
- Simo C., Djocgoue P.F., Mbouobda H.D., Effa O.P., Boudjeko T., Ndiang Z., Omokolo N.D., 2014. Assessing relationship between phenolic compounds and resistance to *Phytophthora megakarya* using two cocoa (*Theobroma cacao*) families. *African Journal of Biotechnology*, 13: 2956-2965.

- Singh G., Sachdev M.S., Tirath A., 2000. Focal cortical-subcortical calcifications (FCSCs) and epilepsy in the Indian subcontinent. *Epilepsia*, 41:718-726.
- Shi Z.Y., Zhang L.Y., Li X.L., Feng G., Tian C.Y., Christie P., 2007. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with desert ephemerals in plant communities of Junggar Basin, northwest China. *Appl Soil Ecol.*, 35 (1): 10-20.
- Slaminko T.L., Miles M.R., Frederick R.D., Bonde M.R., Hartman G.L., 2008. New legume hosts of *Phakopsora pachyrhizi* based on greenhouse evaluations. *Plant Dis.*; 92:767–771.
- Smith S.E. and Read D.J., 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press, 2nd eds. London. 605 p.
- Smith S.E., Smith F.A., 2012. Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungus in plant nutrition and growth. *Mycol.*, 104 (1):1-13.
- Smith S.E., Smith F.A., Jakobsen I., 2003. Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiol.*, 133:16-20.
- Somasegaran P. and Hoben H.J., 1994. Handbook for rhizobia. Springer- Verlag, Berlin. 187p.
- Srivastava D.R.K., Srivastava S.K. and Mukerji K.G., 1996. Vesicular arbuscular mycorrhiza-an overview In: Mukerji K.G. Kluwer (eds). *Concepts in Mycorrhizal Research*. Academic Publishers, Netherlands: 1-39.
- Stalikas C.D., 2007. Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids And flavonoids. *J. Sep. Sci.*, 30: 3268–3295.
- Steffens J.C., Harel E. and Hunt M.D. 1994. Polyphenol oxidase. In : Ellis B. E., Kuroki G. W., Stafford H. A. (Eds). Genetic engineering of plant secondary metabolism. Plenum. New York. pp. 275-312.
- Sweets L.E., Wrather J.A. et Wright S., 2004. Soybean rust. University of Missouri-Columbia;
- Sylvie R., 1999. Les maladies à surveiller chez le soya. *Grandes cultures*, 99 (05): 26-27.
- Sylvere L.D.L., Alain H., Joseph D.F., William N.K.T., Mbatkam B., Fabrice C.G.G. & Zachee A., 2020. Characterization of *Phytophthora infestans* Isolates from Two Potato Varieties in the Highlands Agro-Ecological Zone of Cameroon. *Int. J. of Pathogen Res.*, 5(1): 36-44.
- Stribley D.P., 1990. Mycorrhizal associations and their significance. In: Rabinowitch H.D. et. Brewster J.L. (eds). Onions and allied crops. Boca, Raton, CRC Press, Florida, 2: 85-101.
- Strullu D.G., 1985. Les mycorrhizes Brüder Borntraeger. Berlin. Struttgart. 194 p.
- Strullu D.G., 1990. Les mycorrhizes des arbres et plantes cultivées. Collection TEC & DOC, Lavoisier, Paris, 250 p.
- Strullu D.G., 1991. Les mycorrhizes des arbres et des plantes cultivées. Techniques et Documentation Lavoisier. Paris, 242 p.
- Strullu D G., Diop T. et Plenchette C., 1997. Réalisation de collections in vitro de *Glomus intraradices* (schenck et Smith) et *Glomus versiforme* (Karsten et Berch) et proposition d'un cycle de développement C.R. Acad .Sci.Paris, Sciences de la vie/Life Sciences, 320: 41-47.

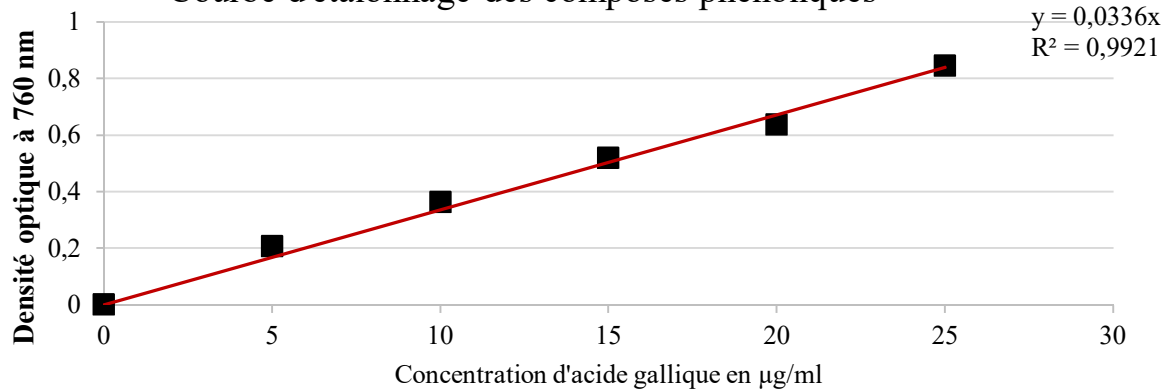
- Svecnjak Z., Varga B. & Butorac J., 2006. Yield Components of Apical and Subapical Ear contributing to the Grain yield Responses of Prolific Maize at High and Low Plant populations. *J. of Agro. and Crop Sci.*, 192 : 37-42.
- Szkutnik F.D., Jedrzejczyk M., Grzeskowiak E., Bartkowiak W.J., Seremak M.A., Drews K. & Mrozikiewicz P.M., 2010. The role of phytoestrogen therapy in relieving postmenopausal symptoms. *Ginekol Pol.*, 81: 929-934.
- Tchameni S.N., Ngonkeu M.E.L., Begoude B.A.D., Wakam N.L., Fokom R., Owona A.D., Mbarga J.B., Tchana T., Tondje P.R., Etoa F.X. and Kuate J., 2011. Effect of *Trichoderma asperellum* and arbuscular mycorrhizal fungi on cocoa growth and resistance against black pod disease. *Cropo*, 30: 1321- 1327.
- Tchoumakov A., zaharova, 1990. Statistic of disease development. Disease damages caused in crop production. Agroprom Izdat, Moscou, pp 53
- Tedersoo L. & Nara K., 2010. General latitudinal gradient of biodiversity is reversed in ectomycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 185: 351-354.
- Tene T.P.M., Ewane C.A., Effa O.P., Boudjeko T. (2017). Effects of chitosan and snail shell powder on cocoa (*Theobroma cacao L.*) growth and resistance against black pod disease caused by *Phytophthora megakarya*. *Afr. J. of Plant Sci.*, 11: 331-340.
- Teran V.A.P., Ascencio L.G., Maldonado M.N. and Ávila V.J., 2007. Asian soybean rust in Mexico. Technical brochure no. 22. INIFAP- CEHUAS. Altamira, Tamaulipas, Mexico.
- Tortora G.J; Funk B.R ; Case. C.L., 2003. Introduction à la microbiologie. Edition du Renouveau Pédagogique Inc. 945 p.
- Twizeyimana M., Ojiambo P.S., Ikotun T., Ladipo J.L., Hartman G.L. and Bandyopadhyay R., 2008. Evaluation of soybean germplasm for resistance to soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Nigeria. *Plant Dis.*, 92: 947-952.
- Trouvelot A., Kough J.L., Gianinazzi-Pearson V., 1986. Mesure du taux de mycorrhizations VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In: Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. (Eds). Physiological and genetical aspects of mycorrhizae. INRA Presse, Paris, France.pp 217-221.
- Twizeyimana M., Ojiambo P.S., Haudenschild J.S., Caetano-Anolle' S.G., Pedley K.F., Bandyopadhyay R., 2011. Genetic structure and diversity of *Phakopsora pachyrhizi* isolates from soyabean. *Plant Pathol.*, 60:719–729.
- Van den Bosch F., Paveley N., Fraaije B., & van den Berg, 2015. Evidence-Based resistance management: A review of existing evidence. In: H. Ishii & W. D. Hollomon (Eds.). *Fungicide resistance in plant pathogen.Principles and guide to practical management* :63-76.
- Van Der Wal A., Van Veen J.A., Pijl A.S., Summerbell R.C. and Boer W.D., 2006. Constraints on development of fungal biomass and decomposition processes during restoration of arable sandy soil. *Soil Biol. & Biochem.*, 38: 2890-2902.
- Verbruggen F., Adams R.C., van't Wout F., Stevens T., McLaren I.P.L. & Chambers C.D., 2013. Are the effects of response inhibition on gambling long-lasting? *PLoS ONE*, 8(7): 1-7.

- Vinayak K. et Bagyaraj D.J., 1990. Vesicular-arbuscular mycorrhizae screened for troyer citrange. *Biol. and Fertility of Soils*, 9: 311-314.
- Vincent, 1970. YMA modifié working with rhizobia (Howieson and dilworthe eds. 2016 ACIAR, CRS).
- Vittal R., Yang H.C., Hartman G.L., 2012. Anastomosis of germ tubes and migration of nuclei in germ tube networks of the soybean rust pathogen, *Phakopsora pachyrhizi*. *Eur J Plant Pathol.*, 132: 163–167
- Vogt T., 2010. Phenylpropanoid biosynthesis. *Mol. Plant* 3: 2–20.
- Wang T.C., and Hartman G.L., 1992. Epidemiology of soybean rust and breeding for host resistance. *Plant Prot. Bull.*, 34: 109-124.
- Wang B. & Qiu Y.L., 2006. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza*, 16 (5): 299-363.
- Wangungu C.W., Mwangi M., Gathu R., Muasya R., Mbaka J., Kori N., 2011. Reducing dieback disease incidence of passion fruit in Kenya through management practices. *Afri. Crop Sci.*, 10: 499-502
- Wagara I.N., Mwang'ombe A.W., Kimenju J.W., Buruchara R.A., Kimani P.M., 2011. Reaction of selected common bean genotypes to physiological races of *Phaeoisariopsis griseola* occurring in Kenya. *Afri Cr Sci J.*, 19 (4): 343 - 355.
- Walker C., Sanders F.E., 1986. Taxonomic concepts in the *Endogonaceae*: III. The separation of *Scutellospora* gen. nov. from *Gigaspora* Gerd. And Trappe. *Mycotaxon*, 27:169–182.
- Walker C., Schüssler A., 2004. Nomenclatural clarifications and new taxa in the *Glomeromycota*. *Mycological Research*, 108: 979–982.
- Walker C. and Schüßler A., 2010. A species list with new families and new genera <http://www.amf-phylogeny.com>
- Weiguang J., Liu X., Cai B., 2013. Diversity of Rhizosphere Soil Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Various Soybean Cultivars under Different Continuous Cropping Regimes. *PLoS ONE*, 8(8): 1-9.
- Whipps J.M., 2004. Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Can J Bot.*, 82: 1198–1227.
- Wright S.F. and Anderson R.L., 2000. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains. *Biol. and Fertility of Soils*, 31: 249–253.
- Yinghui L., Rongxia G., Zhangxiong L., Yansong M., Lixia W., Linhai L., Fanyun L., Weijiang L., Pengyin C., Zhe Y., Yuan G., Li Z., Xuecheng N., Marinus J.M., Smulders W., Rihua P., Yanhua C., Zhongmei Y., Min G., Ruzhen C., Anfu H., Ainong S., Bo Z., Shenlong Z. & Lijuan Q., 2008. Genetic structure and diversity of cultivated soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) landraces in China. *ther. Appl. Genet.*, 117: 857-871.
- Yorinori J.T., Paiva W.M., Frederick R.D., Costamilan L.M., Bertagnolli P.F., Hartman G.E., Godoy C.V. and Nunes J., 2005. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. *Plant Dis.*, 89: 675-677
- Zade S.B., Ingle Y.V. and Ghuge A.S., Wasule D L., 2018. Screening of soybean genotypes for resistance against alternaria leaf spot disease. *J. in Sci., Agric. & Engi*, (8):198-199

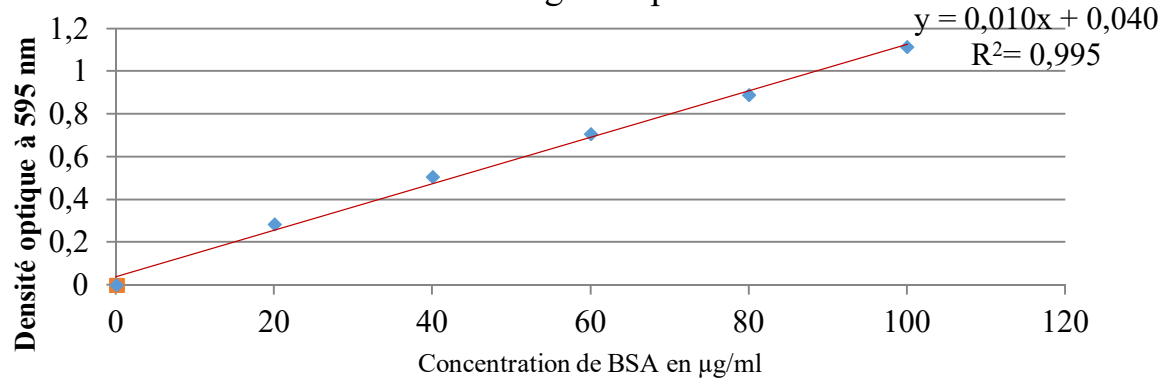
- Zaizen Y., Higuchi Y., Matsuo N., Shirabe K., Tokuda H. & Takeshita M., 2000. Antitumor effects of soybean hypocotyls and soybeans on the mammary tumor induction by N-methyl-n-nitrosourea in F344 rats. *Anticancer Res.*, 20: 1439-1444.
- Zhao T.J. & Gai J.P., 2004. The origin and evolution of cultivated soybean (*Glycine l.*). *Sci. Agric. Sin.*, 37: 954-962.
- Zhao H., Wang J., Wang Y., 2005. Stress stimulation induced of plant. *Plant cell report.* 43: 174-178.

ANNEXES

Courbe d'étalonnage des composés phénoliques



Courbe d'étalonnage des protéines totales



Courbe d'étalonnage du glucose

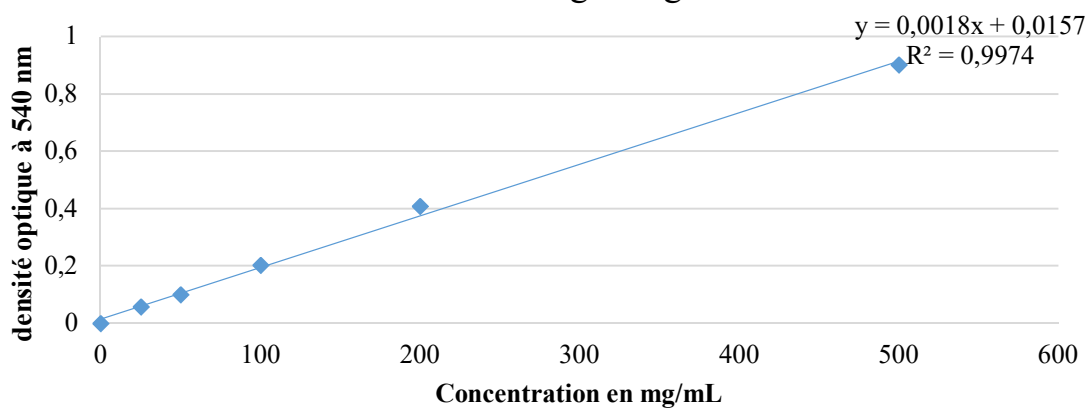


Tableau I. Effet des différents traitements sur la hauteur de la tige en serre

Traitements	Hauteur de la tige		
	6SAS	8SAS	10SAS
T0(M0) ⁺	29,08 ± 7,24c	34,50 ± 8,24b	50,83 ± 11,32bc
T0(M0) ⁻	32,71 ± 8,89bc	37,92 ± 10,69b	48,50 ± 13,44c
T1(M1)	49 ± 10,83abc	68,58 ± 10,63a	92,67 ± 15,28ab
T2(M2)	53,17 ± 12,93ab	68,33 ± 16,66a	91,25 ± 25,42ab
T3(M3)	54,83 ± 9,65ab	83,50 ± 16,30a	103,92 ± 26,92a
T4(M4)	49,25 ± 10,41abc	60,83 ± 10,42ab	93 ± 12,04ab
T5(M1M2)	51,08 ± 9,94abc	69,92 ± 10,75a	103,08 ± 27,34a
T6(M1M3)	55,08 ± 10,87a	70,83 ± 16,56a	106,33 ± 19,38a
T7(M1M4)	61,50 ± 8,99a	76 ± 11a	103,42 ± 26,66a
T8(M2M3)	58,92 ± 9,66a	73,17 ± 12,07a	92,25 ± 16,09ab
T9(M2M4)	55,50 ± 17,04a	67,08 ± 20,97a	89,75 ± 33,37abc
T10(M3M4)	52,75 ± 9,99ab	72,42 ± 11,23a	96,67 ± 22,77a
T11(M1M2M3)	46,42 ± 10,56abc	62,58 ± 21,13ab	88,58 ± 19,54abc
T12(M1M2M4)	45 ± 13,46abc	55,67 ± 16,33ab	79,75 ± 17,42abc
T13(M2M3M4)	49,75 ± 10,67abc	67,92 ± 12,65a	82,33 ± 15,40abc
T14(M1M2M3M4)	47,67 ± 10,61abc	59,58 ± 13,22ab	78,08 ± 13,64abc
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis. Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de Tukey à la probabilité P< 0,05

Tableau II. Effet des différents traitements sur le diamètre au collet en serre

Traitements	Diamètre aux collets		
	6SAS	8SAS	10SAS
T0(M0) ⁺	1,88 ± 0,48b	2,16 ± 0,22b	2,42 ± 0,28b
T0(M0) ⁻	1,85 ± 0,19b	2,13 ± 0,22b	2,46 ± 0,34b
T1(M1)	2,87 ± 0,41ab	3,59 ± 0,57a	4,22 ± 0,81a
T2(M2)	3,15 ± 0,50a	3,67 ± 0,6a	4,41 ± 0,62a
T3(M3)	3,70 ± 0,45a	4,06 ± 0,54a	4,76 ± 0,4a
T4(M4)	2,75 ± 0,71ab	3,25 ± 0,89ab	3,88 ± 1,25ab
T5(M1M2)	3,14 ± 0,41a	3,77 ± 0,79a	4,61 ± 0,83a
T6(M1M3)	3,32 ± 0,62a	4,06 ± 0,48a	4,98 ± 0,60a
T7(M1M4)	2,85 ± 0,59ab	3,71 ± 0,70a	4,13 ± 0,53a
T8(M2M3)	3,61 ± 0,66a	4,33 ± 0,36a	5,08 ± 0,54a
T9(M2M4)	2,88 ± 0,48ab	3,57 ± 0,40a	4,04 ± 0,67a
T10(M3M4)	3,30 ± 0,66a	3,96 ± 0,53a	4,97 ± 0,73a
T11(M1M2M3)	2,758 ± 0,69ab	3,20 ± 0,50ab	3,76 ± 0,52ab
T12(M1M2M4)	3,23 ± 0,67a	4,02 ± 1a	4,51 ± 1,08a
T13(M2M3M4)	3,09 ± 0,74a	3,76 ± 1,31a	4,43 ± 0,97a
T14(M1M2M3M4)	2,92 ± 0,34ab	3,61 ± 0,49a	4,18 ± 0,44a
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis. Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de Tukey à la probabilité P< 0,05

Tableau III. Effet des différents traitements sur le Nombre de feuille en serre

Traitements	Nombre de feuille		
	6SAS	8SAS	10SAS
T0(M0)+	3,17 ± 0,81b	3,58 ± 1,46b	5,08 ± 1,71c
T0(M0)-	3,33 ± 1,08b	4 ± 1,58b	4,50 ± 1,30c
T1(M1)	7,50 ± 2,42a	9,92 ± 2,80a	15,67 ± 2,38ab
T2(M2)	8 ± 1,70a	11,67 ± 2,60a	17,08 ± 2,45ab
T3(M3)	9,08 ± 1,53a	13,75 ± 2,65a	20,12 ± 2,20ab
T4(M4)	7,50 ± 2,56a	10,67 ± 4,13a	14,50 ± 4,28b
T5(M1M2)	8,58 ± 2,35a	11,67 ± 2,85a	17,33 ± 2,42ab
T6(M1M3)	10,58 ± 2,51a	12,67 ± 3,07a	18,42 ± 3,05ab
T7(M1M4)	7,75 ± 2,01a	11,25 ± 2,56a	16 ± 2,89ab
T8(M2M3)	8,67 ± 1,96a	13,25 ± 2,58a	21,12 ± 4,08a
T9(M2M4)	7,08 ± 1,77ab	9,83 ± 2,22a	14,92 ± 2,59ab
T10(M3M4)	9,42 ± 2,81a	13 ± 3,60a	19 ± 4,39ab
T11(M1M2M3)	6,92 ± 1,39ab	10,25 ± 3,47a	14,08 ± 5,13b
T12(M1M2M4)	8,25 ± 1,96a	12,67 ± 2,54a	18,33 ± 2,87ab
T13(M2M3M4)	8,67 ± 2,20a	13,25 ± 2,01a	18,67 ± 3,71ab
T14(M1M2M3M4)	7,17 ± 2,31ab	10,25 ± 3,58a	15,67 ± 2,82ab
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis. Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de tukey à la probabilité P< 0,05

Tableau IV. Effet des différents traitements sur l'incidence de la maladie en serre

Traitements	Incidence (%)		
	6SAS	8SAS	10SAS
T0(M0)-	91,67 ± 5,77a	100a	100a
T0(M0)+	83,33 ± 2,88b	91,67 ± 5,77a	100a
T1(M1)	33,33 ± 2,88c	50 ± 2,50d	91,67 ± 5,77a
T2(M2)	8,33 ± 0,76d	33,33 ± 3,01e	66,67 ± 2,88bc
T3(M3)	0e	66,67 ± 5,77bc	50d
T4(M4)	8,33 ± 1,04d	50 ± 6,50d	91,67 ± 5,77a
T5(M1M2)	0e	50 ± 4,76d	66,67 ± 5,77bc
T6(M1M3)	8,33 ± 0,76d	33,33 ± 2,88e	50 ± 3,12d
T7(M1M4)	0e	33,33 ± 2,88e	50 ± 1,32d
T8(M2M3)	0e	58,33 ± 4,25cd	66,67 ± 5,77bc
T9(M2M4)	8,33 ± 0,57d	58,33 ± 3,78cd	58,33 ± 5,20cd
T10(M3M4)	0e	75 ± 9,9b	75 ± 8,66b
T11(M1M2M3)	8,33 ± 1,44d	33,33 ± 3,01e	66,67 ± 5,20bc
T12(M1M2M4)	8,33 ± 1,44d	58,33 ± 0,57cd	58,33 ± 0,76cd
T13(M2M3M4)	0e	50 ± 3,50d	58,33 ± 4,53cd
T14(M1M2M3M4)	0e	33,33 ± 2,88e	50 ± 2,50d
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

P: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05; SAS: semaine après semis. Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de tukey à la probabilité P< 0,05

Tableau V. Effet des différents traitements sur la sévérité de la maladie en serre

Traitements	Sévérité (%)		
	6SAS	8SAS	10SAS
T0(M0) ⁻	14,08 ± 0,62a	24,17 ± 1,01a	59,83 ± 2,25a
T0(M0) ⁺	13,17 ± 0,38b	17,25 ± 0,66b	21,67 ± 0,72b
T1(M1)	1,17 ± 0,28c	4,58 ± 0,52cde	9,25 ± 0,66c
T2(M2)	0,33 ± 0,14de	3,25 ± 0,43efg	4,58 ± 0,52ef
T3(M3)	0e	3,92 ± 0,59def	4,17 ± 0,072ef
T4(M4)	0,50 ± 0,25cde	5,17 ± 0,62cd	7,67 ± 0,38cd
T5(M1M2)	0e	6 ± 0,50c	6,17 ± 0,14de
T6(M1M3)	0,33 ± 0,14de	1,33 ± 0,14hi	2,67 ± 0,38fg
T7(M1M4)	0e	0,83 ± 0,14i	3,08 ± 0,38fg
T8(M2M3)	0e	3,08 ± 0,28fg	4,50 ± 0,50ef
T9(M2M4)	0,50 ± 0,12cde	1,58 ± 0,47hi	1,67 ± 0,14g
T10(M3M4)	0e	2 ± 0,43ghi	4,42 ± 0,38ef
T11(M1M2M3)	0,67 ± 0,28cde	2 ± 0,33ghi	4,75 ± 0,43ef
T12(M1M2M4)	0,83 ± 0,14cd	2,5 ± 0,25fgh	4,42 ± 0,52ef
T13(M2M3M4)	0e	2,5 ± 0,43fgh	2,83 ± 0,62fg
T14(M1M2M3M4)	0e	1 ± 0,25i	2,83 ± 0,14fg
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***	<0,001***

Les valeurs de chaque colonne présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au test de LSD à la probabilité P< 0,05

Tableau VI. Effet des traitements sur la fréquence et de l'intensité de mychorization

Traitements	Fréquences (%)	Intensités (%)
T0(M0) ⁻	0f	0j
T0(M0) ⁺	0f	0j
T1(M1)	58,33 ± 7,60abc	4,28 ± 0,02d
T2(M2)	31,67 ± 8,14e	0,32 ± 0,05j
T3(M3)	68,33 ± 10,19a	4,83 ± 0,43c
T4(M4)	45 ± 7,45cde	1,25 ± 0,05gh
T5(M1M2)	60 ± 14,14ab	1,35 ± 0,17g
T6(M1M3)	41 ± 67 ± 24,70de	2,27 ± 0,04f
T7(M1M4)	58,33 ± 8,45abc	3,8 ± 0,42e
T8(M2M3)	58,33 ± 9,30abc	1,25 ± 0,34gh
T9(M2M4)	60 ± 8,74ab	4,30 ± 0,09d
T10(M3M4)	46,67 ± 16,32bcd	0,78 ± 0,16j
T11(M1M2M3)	55 ± 6,16abcd	4,25 ± 0,0d
T12(M1M2M4)	55 ± 18,70	5,55 ± 0,45b
T13(M2M3M4)	63,33 ± 13,30a	8,95 ± 0,30a
T14(M1M2M3M4)	48,33 ± 17,76bcd	0,88 ± 0,06hi
Pr(>F)	<0,001***	<0,001***

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P< 0,05

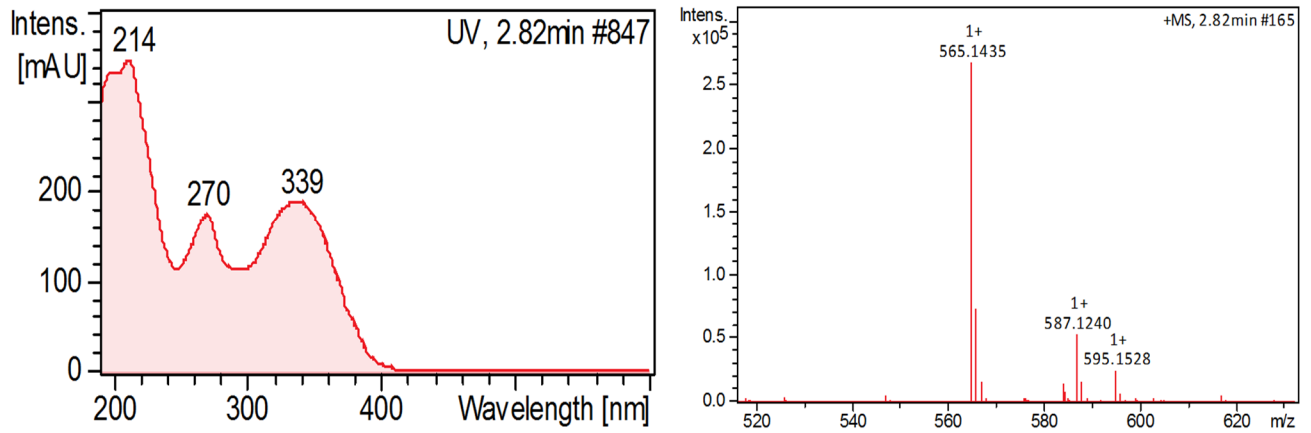


Fig.1 Spectre de masse et UV de la genisteine identifié dans les extraits de feuilles mycorhizé de la variété V1(A8)

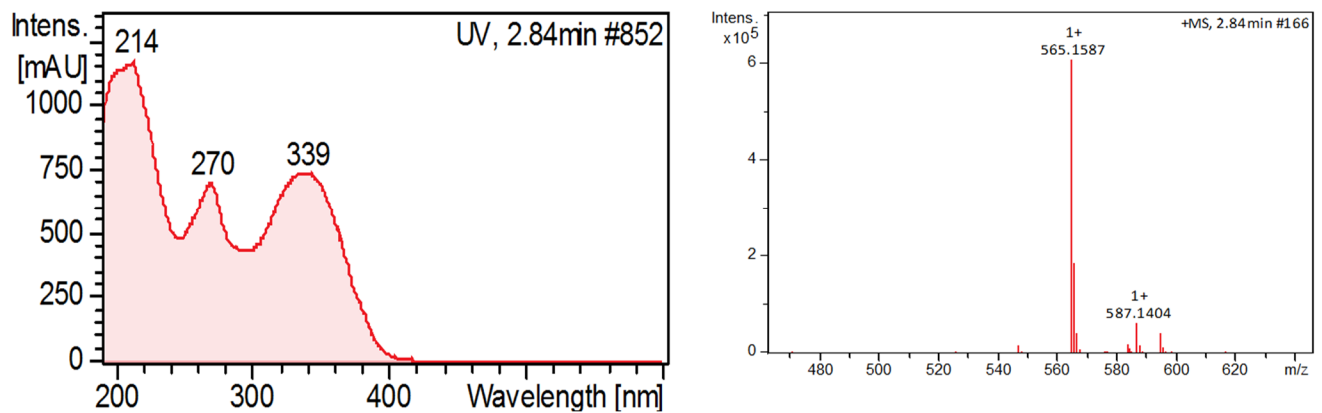


Fig.2 Spectre de masse et UV de la genisteine acetylglycoside identifié dans les extraits de feuilles mycorhizé de la variété V1 (A8)

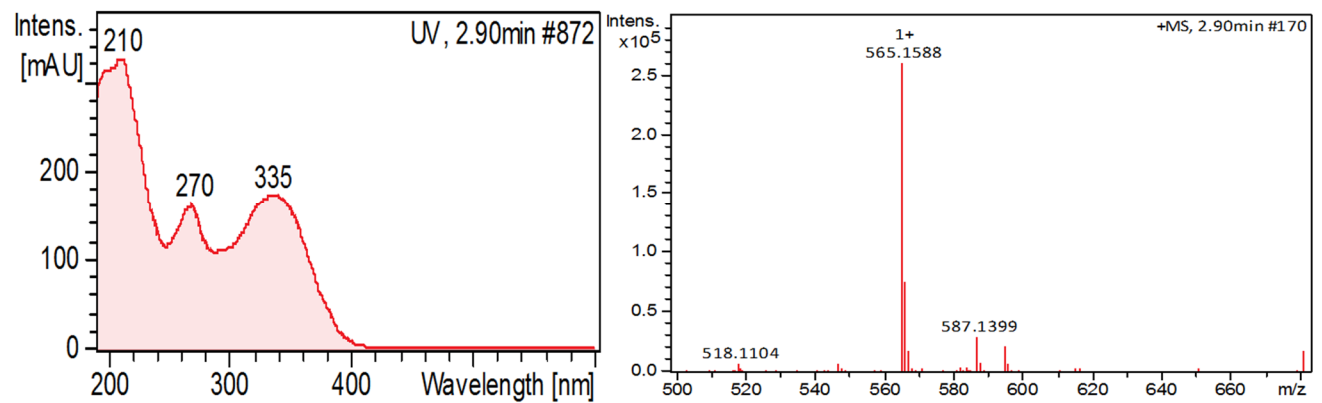


Fig.3 Spectre de masse et UV de la genisteine 4',7-O-diglucosidedimethylmalonylated identifié chez les feuilles mycorhizé de la variété V1 (A8)

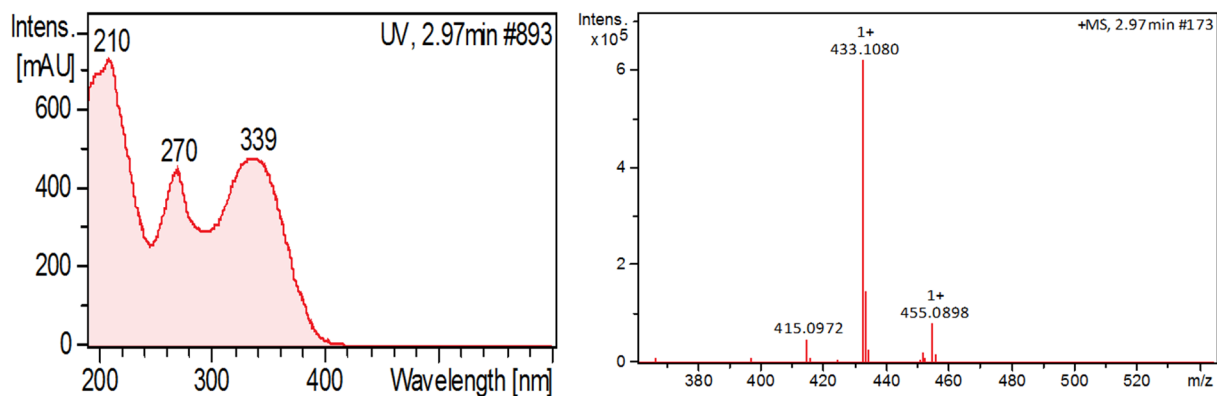


Fig.4 Spectre de masse et UV de la daizeine identifié dans les feuilles mycorhizé de la variété V1(A8)

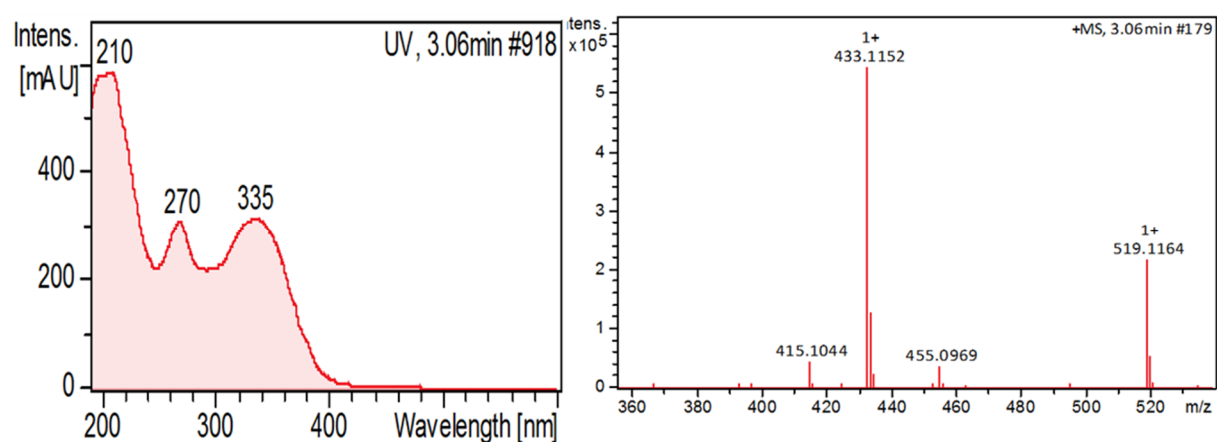


Fig.5 Spectre de masse et UV de la genistein malonylglycoside identifié dans les feuilles de soja de la variété V2(A4)

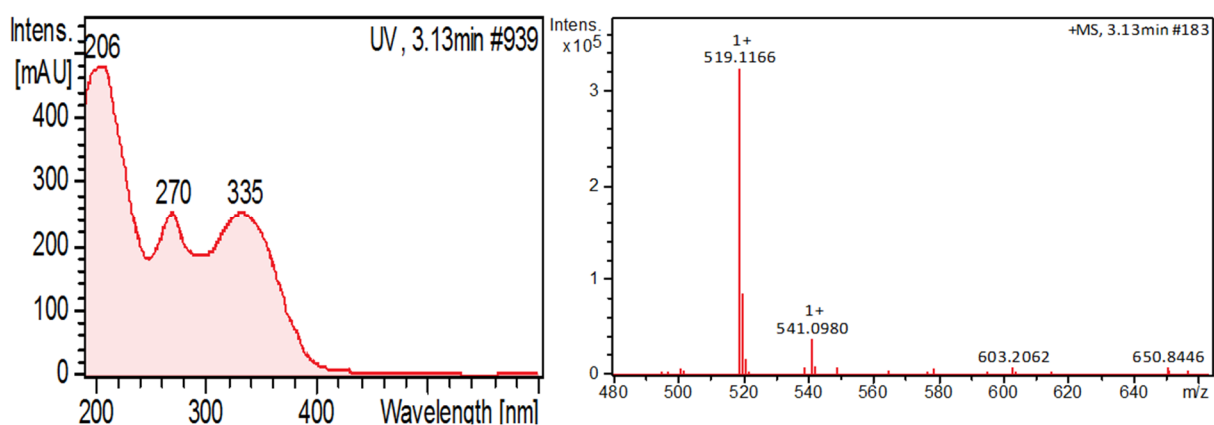


Fig.6 Spectre de masse et UV de la daizeine-7-glucoside identifié dans les feuilles des plantes de soja mycorhizé de la variété V2(A4)

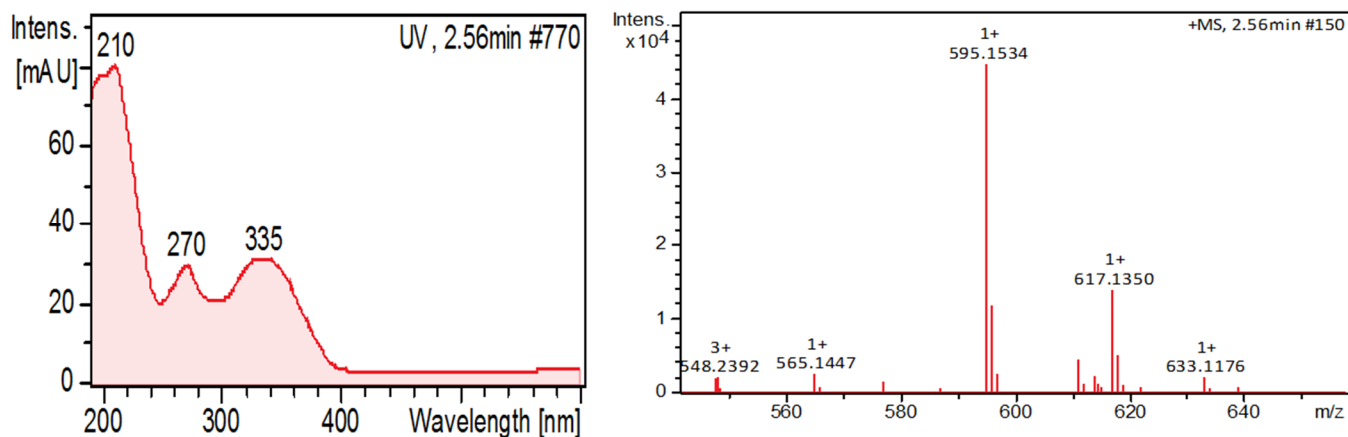


Fig.7 Spectre de masse et UV de la daidzeine identifié dans les feuilles des plantes mycorhizé de la variété de soja V2(A4)

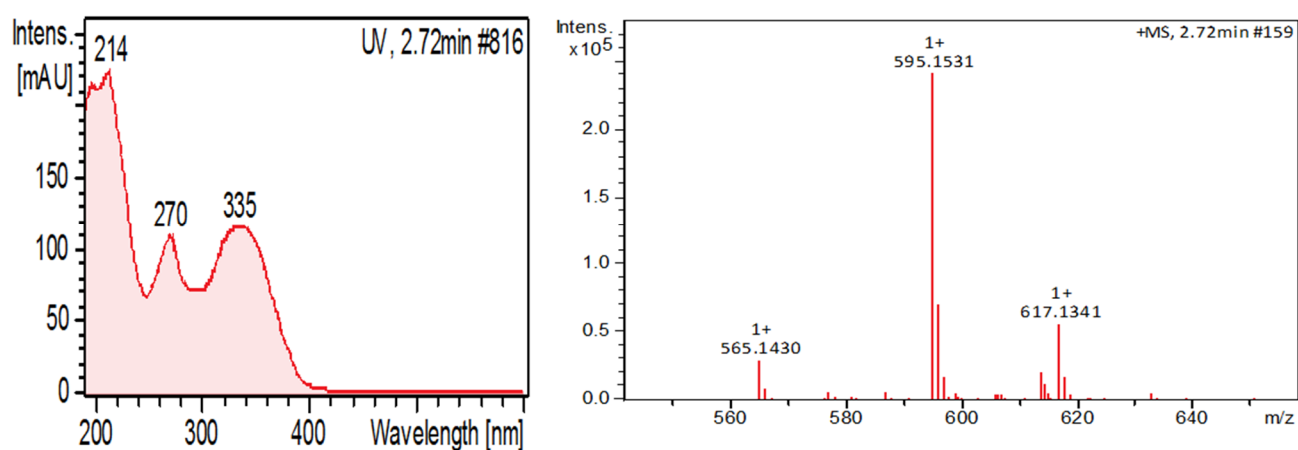


Fig.8 Spectre de masse et UV de la genisteine identifié dans les feuilles des plantes mycorhizé de la variété de soja V2 (A4)

Tableau VII. Effet des traitements et variété sur la hauteur de la tige en fonction des sites

Traitements	Hauteur de la tige					
	Bangangté			Mfou		
	6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
T0 ⁺	10,13 ± 2,16abcd	18,03 ± 4,23bc	24 ± 4,79b	11,47 ± 0,80abcd	20,53 ± 0,24bcde	25,63 ± 1,66bc
T0 ⁻	10,13 ± 2,14abcd	18,05 ± 4,25bc	24,30 ± 5,36b	12,15 ± 0,58ab	20,55 ± 0,46bcde	25,27 ± 1,22c
T1	10,82 ± 2,28abc	20,92 ± 3,61ab	29,85 ± 6,05ab	10,9 ± 0,82cd	21,35 ± 2,09ab	30,50 ± 5,47a
T2	11,55 ± 1,59a	22,57 ± 3,41a	31,67 ± 4,94a	12,32 ± 0,76a	21,45 ± 0,48ab	28,63 ± 1,74abc
T3	8,85 ± 1,18cd	16,12 ± 2,72c	24,78 ± 4,29b	11,93 ± 0,73abc	20,62 ± 0,44bcde	29,13 ± 2,15ab
T4	10,48 ± 1,47abcd	20,07 ± 2,28abc	28,15 ± 5,78ab	11,44 ± 0,93abcd	21,15 ± 0,88abc	27,68 ± 3,86abc
T5	8,37 ± 1,88d	17,25 ± 2,67bc	26,55 ± 6,08ab	11,86 ± 1,61abc	19,90 ± 0,59de	28,80 ± 1,73abc
T6	11,32 ± 1,63ab	21,03 ± 4,43ab	31,18 ± 6,91a	10,50 ± 1,03d	19,73 ± 0,74e	28,47 ± 1,81abc
T7	9,22 ± 2,28bcd	17,38 ± 3,28bc	26,33 ± 6,66ab	10,93 ± 0,89cd	20,13 ± 1,72cde	28 ± 5,01 abc
T8	9,75 ± 1,90abcd	17,83 ± 3,88bc	26,02 ± 4,90ab	11,19 ± 0,72bcd	20,43 ± 0,81bcde	28,40 ± 3,61abc
T9	8,72 ± 1,71cd	17,33 ± 3,06bc	25,87 ± 4,34ab	11,75 ± 0,50abc	20,93 ± 0,59abcd	30,12 ± 2,36a
T10	9,85 ± 2,20abcd	19,58 ± 4,47abc	29,13 ± 6,49ab	11,31 ± 1,19abcd	22,02 ± 1,02a	29,77 ± 4,30a
T11	10,25 ± 1,84abcd	17,90 ± 3,29bc	26,67 ± 4,64ab	11,79 ± 1,14abc	20,77 ± 0,82bcde	29,47 ± 2,14a
T12	9,80 ± 1,58abcd	19,58 ± 4,05abc	28,43 ± 4,49ab	12,25 ± 0,75ab	21,15 ± 0,85abc	29,50 ± 2,97a
T13	10,07 ± 2,66abcd	22,43 ± 3,54a	31,20 ± 6,38a	12,06 ± 0,62ab	21,33 ± 0,89ab	30 ± 2,57a
T14	9,40 ± 1,71abcd	18,83 ± 2,61abc	28,88 ± 4,41ab	11,42 ± 1,09abcd	20,97 ± 0,75abcd	29,98 ± 2,64a
Variétés						
TGX-1835-10E (V1)	9,73 ± 1,67a	18,28 ± 3,25b	23,57 ± 3,24b	11,81 ± 1,05a	20,65 ± 1,03a	26,49 ± 2,03b
R3(V2)	10,11 ± 2,22a	19,83 ± 4,09a	31,81 ± 4,21a	11,35 ± 0,87b	20,97 ± 1,05a	30,92 ± 2,53a

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P < 0,05

Tableau VIII. Effet des traitements sur le diamètre au collet en fonction des sites

Traitements	Diamètre au collet					
	Bangangté			Mfou		
	6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
T0+	3,74 ± 0,36ab	4,59 ± 0,65bc	5,82 ± 1,06abc	4,22 ± 0,69a	5,63 ± 0,71bc	6,15 ± 0,88ab
T0-	3,78 ± 0,51ab	4,55 ± 0,53bc	5,78 ± 1,09abc	4,28 ± 0,77a	5,77 ± 0,69abc	6,18 ± 1,04ab
T1	3,96 ± 0,25ab	5,35 ± 0,75ab	6,57 ± 1,06ab	4,47 ± 0,59a	5,88 ± 0,71abc	6,53 ± 1,13ab
T2	4,12 ± 0,59ab	5,19 ± 0,58abc	6,06 ± 0,64abc	4,83 ± 0,19a	6,5 ± 0,68a	7,02 ± 0,60ab
T3	3,62 ± 0,4ab	4,76 ± 0,52abc	5,57 ± 1,13bc	4,41 ± 0,87a	6,08 ± 0,64abc	7,20 ± 1,01a
T4	3,93 ± 0,64ab	5,05 ± 0,83abc	6,21 ± 1,15abc	4,67 ± 0,66a	6,22 ± 0,67ab	7,22 ± 1,30a
T5	3,7 ± 0,43ab	4,81 ± 0,65abc	5,89 ± 1,19abc	4,17 ± 0,75a	5,6 ± 0,59bc	6,55 ± 1,69ab
T6	4,14 ± 0,64a	5,14 ± 0,74abc	6,54 ± 1,09ab	4,21 ± 0,75a	5,45 ± 0,62bc	6,10 ± 0,75ab
T7	3,76 ± 0,41ab	4,84 ± 0,76abc	6,05 ± 1,12abc	4,56 ± 0,79a	6,07 ± 0,83abc	7,13 ± 1,30ab
T8	3,55 ± 0,32b	4,45 ± 0,56c	5,19 ± 0,5c	4,21 ± 0,60a	6,02 ± 0,64abc	6,75 ± 1,6ab
T9	3,83 ± 0,53ab	4,81 ± 0,71abc	5,87 ± 0,62abc	4,22 ± 0,43a	5,98 ± 0,65abc	6,54 ± 1,58ab
T10	3,80 ± 0,71ab	4,86 ± 1,14abc	5,86 ± 1,16abc	4,13 ± 0,54a	5,48 ± 0,54bc	5,83 ± 0,38b
T11	3,63 ± 0,45ab	4,56 ± 0,45bc	5,66 ± 0,76bc	4,18 ± 0,46a	5,30 ± 0,80c	5,82 ± 0,68b
T12	3,57 ± 0,53ab	4,82 ± 0,436abc	5,74 ± 0,47abc	4,35 ± 0,58a	5,85 ± 0,65abc	6,58 ± 0,70ab
T13	4,14 ± 0,77a	5,53 ± 1,03a	6,87 ± 1,47a	4,19 ± 0,31a	5,5 ± 0,45bc	6,32 ± 0,71ab
T14	3,81 ± 0,24ab	4,96 ± 0,50abc	6,47 ± 0,69ab	4,15 ± 0,58a	5,68 ± 0,84bc	6,35 ± 0,92ab
Variétés						
TGX-1835-10E (V1)	3,78 ± 0,36a	4,67 ± 0,57b	5,54 ± 0,61b	4,16 ± 0,57b	5,69 ± 0,65a	6,31 ± 1,03a
R3 (V2)	3,85 ± 0,61a	5,11 ± 0,77a	6,47 ± 1,10a	4,51 ± 0,60a	5,93 ± 0,73a	6,72 ± 1,13a

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P < 0,05

Tableau IX. Effet des traitements sur le nombre de feuilles en fonction des sites

Traitements	Nombre de feuilles					
	Bangangté			Mfou		
	6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
T0-	3,27 ± 0,30ab	6,93 ± 1,47ab	15,40 ± 2,60d	3,33 ± 0,27ab	8,87 ± 0,73de	19,07 ± 0,94f
T0+	3,17 ± 0,23ab	7,47 ± 1,39ab	16,5 ± 2,73cd	3,37 ± 0,26a	8,70 ± 0,92e	19,23 ± 0,78ef
T1	3,27 ± 0,24ab	8,57 ± 1,16a	20,97 ± 3,36ab	3,4 ± 0,17a	9,47 ± 0,56cde	22,27 ± 0,76abcd
T2	3,27 ± 0,24ab	8,50 ± 1,95a	21,83 ± 2,93a	3,17 ± 0,15ab	10,70 ± 1,15ab	24,37 ± 2,39a
T3	2,97 ± 0,15b	6,63 ± 1,67b	17,63 ± 3,67bcd	3 ± 0,30ab	9,6 ± 0,88bcde	24 ± 2,87ab
T4	3,07 ± 0,16b	8,43 ± 1,74ab	20,80 ± 3,97ab	3,13 ± 0,32ab	10,20 ± 0,76abc	22,97 ± 2,45abcd
T5	3,03 ± 0,37b	7,13 ± 1,36ab	17,93 ± 3,64bcd	3,20 ± 0,30ab	9,90 ± 1,84bcd	24,10 ± 3,91ab
T6	3,23 ± 0,32ab	8,50 ± 1,64a	21,87 ± 2,76a	3,07 ± 0,41ab	8,97 ± 0,85de	21,37 ± 0,70de
T7	3,13 ± 0,35ab	7,30 ± 1,12ab	18,97 ± 3,44abcd	3,27 ± 0,45ab	11,23 ± 0,90a	23,77 ± 0,71abc
T8	3,13 ± 0,30ab	7,43 ± 1,45ab	17,87 ± 4,73bcd	3 ± 0,47ab	10,33 ± 0,73abc	22,20 ± 2,67bcd
T9	3,07 ± 0,37b	7 ± 1,25ab	17,60 ± 3,06bcd	3,33 ± 0,45ab	10,30 ± 0,78abc	21,80 ± 0,78cd
T10	3 ± 0,4b	7,73 ± 2,16ab	20,17 ± 2,94abc	3,13 ± 0,20ab	9,33 ± 0,97cde	21,37 ± 0,73de
T11	3,07 ± 0,20b	7,10 ± 1,18ab	17,30 ± 2,91bcd	2,93 ± 0,57b	10 ± 1,1bcd	21,50 ± 0,95d
T12	3 ± 0,17b	7,43 ± 1,25ab	19,17 ± 2,84abcd	3,17 ± 0,38ab	9,40 ± 0,68cde	23,67 ± 2,51abc
T13	3,43 ± 0,42a	8,43 ± 2,21ab	22,57 ± 2,97a	3,17 ± 0,23ab	9,4 ± 1,08cde	22,03 ± 1,09bcd
T14	3,20 ± 0,21ab	7,33 ± 1,61ab	19,07 ± 3,28abcd	3,10 ± 0,61ab	10,23 ± 1,34abc	21,83 ± 0,97cd
Variétés						
TGX-1835-10E (V1)	3,13 ± 0,27a	7,77 ± 1,39a	19,80 ± 2,87a	3,17 ± 0,33a	10,25 ± 1,16a	23,03 ± 2,40a
R3 (V2)	3,14 ± 0,32a	7,53 ± 1,72a	18,53 ± 4,12a	3,18 ± 0,40a	9,33 ± 0,92b	21,41 ± 1,91b

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P < 0,05

Tableau X. Effet des traitements sur l'incidence de la maladie en fonction des sites.

Traitements	Incidence (%)					
	Bangangté			Mfou		
	6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
T0 ⁻	20,37 ± 9,09ab	52,96 ± 12,16a	77,77 ± 24,51a	52,78 ± 2,46a	91,67 ± 9,78a	99,07 ± 2,26a
T0 ⁺	21,29 ± 9,55a	36,11 ± 7,05b	52,78 ± 14,48b	49,08 ± 5,54ab	75,93 ± 26,41a	89,81 ± 11,70bc
T1	14,29 ± 3,91ab	22,48 ± 2,89cd	39,82 ± 8,01bc	35,19 ± 6,25cde	75 ± 27,42a	94,45 ± 7,21abc
T2	19,45 ± 7,54ab	25,93 ± 5,51bcd	37,04 ± 7,82cd	27,78 ± 6,16ef	73,15 ± 29,51a	97,22 ± 4,64ab
T3	11,11 ± 7,09b	15,74 ± 4,41d	21,29 ± 8,16e	27,65 ± 2,48ef	75,93 ± 26,53a	87,29 ± 5,73c
T4	21,29 ± 6,29a	22,22 ± 4,37cd	24,08 ± 5,48de	24,09 ± 2,59f	89,82 ± 11,50a	95,37 ± 6,49abc
T5	14,82 ± 6,53ab	17,59 ± 2,91cd	25 ± 5,44de	38,88 ± 8,31cd	82,41 ± 19,45a	94,45 ± 6,94abc
T6	16,67 ± 6,39ab	25,93 ± 5,19bcd	33,33 ± 7,12cde	39,82 ± 3,50c	78,70 ± 23,41a	95,37 ± 6,49abc
T7	14,82 ± 6,87ab	23,15 ± 6,70cd	33,33 ± 8,82cde	40,74 ± 8,18c	79,63 ± 22,41a	95,37 ± 6,17abc
T8	12,04 ± 7,54ab	19,45 ± 8,64cd	25,93 ± 6,98de	39,81 ± 5,19c	80,55 ± 21,50a	96,29 ± 4,53abc
T9	12,96 ± 6,87ab	22,23 ± 5,03cd	32,41 ± 7,25cde	34,26 ± 3,15cde	75,93 ± 26,42	97,22 ± 4,64ab
T10	14,82 ± 6,63ab	24,07 ± 6,91cd	27,77 ± 9,33cde	31,48 ± 6,23def	72,22 ± 30,52a	95,37 ± 6,49abc
T11	19,44 ± 5,64ab	25 ± 6,24cd	26,85 ± 8,06cde	53,70 ± 12,24a	85,18 ± 16,63a	93,52 ± 7,58abc
T12	15,74 ± 4,19ab	22,23 ± 5,34cd	26,85 ± 8,36cde	41,67 ± 1,51bc	79,79 ± 22,17a	93,52 ± 7,91abc
T13	18,52 ± 8,75ab	26,85 ± 4,81bc	30,56 ± 9,66cde	27,78 ± 6,19ef	76,85 ± 25,41a	92,59 ± 8,42abc
T14	12,96 ± 8,60ab	19,45 ± 4,44cd	27,78 ± 7,25cde	33,93 ± 1,21cde	75,43 ± 26,95a	87,96 ± 13,46c
Variétés						
TGX-1835-10E (V1)	9,31 ± 3,62b	18,67 ± 8,136b	24,19 ± 11,34b	38,83 ± 11,86a	58,52 ± 11,41b	89,24 ± 6,98b
R3 (V2)	23,26 ± 6,47a	31,48 ± 11,99a	43,63 ± 18,22a	35,99 ± 9,72a	100a	100a

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P < 0,05

Tableau XI. Effet des traitements sur la sévérité de la maladie en fonction des sites au cours du temps

Traitements	Sévérité(%)					
	Bangangté			Mfou		
	6SAS	8SAS	10SAS	6SAS	8SAS	10SAS
T0-	10,75 ± 5,03a	15,95 ± 5,52a	26,56 ± 8,80a	3,78 ± 1,15a	18,33 ± 5,55a	39,40 ± 4,75a
T0+	6,67 ± 2,42b	10,34 ± 3,33b	11,34 ± 4,84b	2,67 ± 1,11a	4,45 ± 1,85b	6,99 ± 2,69bc
T1	5,58 ± 2,57bc	9,71 ± 2,85b	10,86 ± 4,50bc	3,57 ± 1,24a	6,38 ± 2,09b	8,02 ± 2,10b
T2	4,87 ± 1,63bc	8,24 ± 3,09bc	10,11 ± 4,09bc	3,38 ± 1,20a	4,45 ± 1,80b	5,44 ± 3,04bc
T3	3,16 ± 2,06c	6,45 ± 2,96bc	7,66 ± 3,14bc	3,39 ± 1,41a	3,77 ± 1,30b	4,20 ± 1,41c
T4	4,65 ± 2,48bc	10,01 ± 3,78b	11,95 ± 5,30bc	4,60 ± 1,21a	4,87 ± 1,27b	5,95 ± 1,60bc
T5	3,78 ± 3,09bc	9,35 ± 3,65b	11,56 ± 3,83bc	3,77 ± 1,82a	4,16 ± 1,39b	4,90 ± 1,70bc
T6	4,33 ± 2,16bc	7,12 ± 3,22bc	7,56 ± 3,51bc	3,60 ± 1,92a	3,96 ± 1,03b	4,37 ± 2,03cbc
T7	4,36 ± 2,14bc	8,63 ± 4,03bc	8,63 ± 3,25bc	3,78 ± 1,28a	4,87 ± 1,68b	5,77 ± 1,56bc
T8	4,71 ± 1,84bc	9,04 ± 4,13bc	9,57 ± 4,30bc	2,91 ± 2,10a	4,98 ± 1,31b	5,65 ± 0,93bc
T9	4,62 ± 3,21bc	9,33 ± 3,49bc	10,59 ± 4,23bc	3,49 ± 1,90a	5,02 ± 2,32b	5,32 ± 1,25bc
T10	3,76 ± 2,69bc	6,53 ± 2,30bc	9,57 ± 2,56bc	3,82 ± 1,52a	4,30 ± 1,39b	5,32 ± 1,09bc
T11	4,07 ± 1,77bc	6,85 ± 2,75bc	9,19 ± 3,35bc	3,34 ± 1,62a	4,86 ± 1,65b	5,84 ± 1,91bc
T12	4,21 ± 2,42bc	7,44 ± 3,16bc	9,38 ± 4,05bc	3,88 ± 1,27a	4,35 ± 2,48b	5,18 ± 1,54bc
T13	4,14 ± 1,91bc	6,50 ± 1,93bc	6,56 ± 2,50c	3,64 ± 1,11a	4,06 ± 1,99b	4,29 ± 1,28c
T14	3,94 ± 2,43bc	5,46 ± 2,64c	7,53 ± 3,32bc	4,13 ± 1,95a	5,16 ± 2,15b	4,86 ± 1,39bc
Variétés						
TGX-1835-10E(V1)	4,26 ± 2,34a	7,33 ± 3,01b	8,78 ± 4,50b	2,82 ± 1,18b	3,70 ± 1,11b	4,89 ± 1,38b
R3 (V2)	5,44 ± 3,37a	9,79 ± 4,38a	12,28 ± 6,79a	4,54 ± 2,28a	7,29 ± 2,86a	10,30 ± 3,46a

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité P < 0,05

Tableau XII. Effet des traitements sur la fréquence et l'intensité de mycorhization

Traitements	Fréquence (%) et Intensité I(%) de mycorhization			
	Bangangté		Mfou	
	F(%)	I(%)	F(%)	I(%)
T0-	10 ± 5,17e	0,10 ± 0,04i	15 ± 3,74e	0,15 ± 0,04g
T0+	10 ± 5,13e	0,10 ± 0,05i	15 ± 4,24e	0,15 ± 0,05g
T1	38,33 ± 7,52d	0,45 ± 0,18fg	36,67 ± 7,81cd	0,63 ± 0,09cde
T2	33,33 ± 5,16d	0,33 ± 0,05ghi	30 ± 6,32d	0,30 ± 0,05fg
T3	65 ± 5,47a	1,38 ± 0,17a	38,33 ± 9,30bcd	0,78 ± 0,09abcd
T4	38,33 ± 7,52d	0,72 ± 0,19cde	50 ± 16,43abc	0,77 ± 0,24abcd
T5	43,33 ± 23,38cd	0,83 ± 0,66bcd	51,67 ± 18,34ab	0,98 ± 0,21ab
T6	15 ± 5,13e	0,15 ± 0,05hi	35 ± 8d	0,55 ± 0,18def
T7	33,33 ± 8,16d	0,33 ± 0,08ghi	33,33 ± 7,32d	0,33 ± 0,07efg
T8	36,67 ± 8,16d	0,37 ± 0,07gh	33,33 ± 8,16d	0,33 ± 0,06efg
T9	43,33 ± 8,16cd	0,40 ± 0,08fgh	31,67 ± 7,81d	0,32 ± 0,08efg
T10	66,67 ± 8,16a	1,40 ± 0,20a	50 ± 8,94abc	0,90 ± 0,08abc
T11	60 ± 8,94ab	1 ± 0,29b	55 ± 14,14a	1,08 ± 0,23a
T12	43,33 ± 10,32cd	0,63 ± 0,20def	50 ± 12,94abc	0,97 ± 0,34ab
T13	36,67 ± 8,16d	0,57 ± 0,26efg	36,67 ± 8,16cd	0,70 ± 0,2bcd
T14	51,67 ± 7,52bc	0,92 ± 0,07bc	41,67 ± 12,50abcd	0,62 ± 0,12cdef
Variétés				
TGX-1835-10E(V1)	39,58 ± 19,18a	0,60 ± 0,45a	38,95 ± 8,01a	0,67 ± 0,26a
R3 (V2)	38,54 ± 18,53a	0,61 ± 0,45a	36,46 ± 6,46a	0,52 ± 0,29a

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité $P < 0,05$

Tableau XIII. Effet des traitements sur les rendements en t/ha

Traitements	Rendement en t/ha	
	Bangangté	Mfou
T0-	0,63 ± 0,25e	0,64 ± 0,29c
T0+	1,05 ± 0,36cde	0,92 ± 0,30bc
T1	1,06 ± 0,41cde	1,17 ± 0,30ab
T2	1,14 ± 0,39bcd	1,13 ± 0,40ab
T3	1,53 ± 0,49a	1,39 ± 0,39a
T4	1,20 ± 0,38abcd	1,23 ± 0,45ab
T5	1,03 ± 0,35de	1,12 ± 0,43ab
T6	1,47 ± 0,41abc	1,16 ± 0,40ab
T7	1,09 ± 0,34bcd	1,07 ± 0,32ab
T8	0,89 ± 0,33de	1,19 ± 0,37ab
T9	0,98 ± 0,37de	1,07 ± 0,32ab
T10	1,07 ± 0,38cde	0,93 ± 0,30bc
T11	1,08 ± 0,32cd	0,96 ± 0,31bc
T12	1,16 ± 0,35abcd	1,31 ± 0,39ab
T13	1,59 ± 0,51ab	1,39 ± 0,39a
T14	1,27 ± 0,42abcd	0,93 ± 0,26bc
Variétés		
TGX-1835-10 E (V1)	1,23 ± 0,45a	1,18 ± 0,39a
R3 (V2)	1,05 ± 0,38b	1,02 ± 0,35b

Dans chaque colonne, les valeurs présentant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au LSD test à la probabilité $P < 0,05$

PUBLICATIONS

Performance of soybean genotypes (*Glycine Max* L.) against Asian rust (*Phakopsora Pachyrhizi* Syd.) in Cameroon

Fabrice Christian Gbaporo Gbaporo ¹, Alain Heu ², Serge Bertrand Mboussi ³, Patrice Zemko Ngatsi ¹, William Norbert Tueguem Kuate ¹, Sylvere Landry Lontsi Dida ¹, Stephane Kamtchoum ⁴ and Zachée Ambang ^{1,*}

¹ University of Yaoundé 1, Faculty of Science, Laboratory of Biotechnology and Environment, Phytopathology and Plant Protection Research Unit, Yaoundé, Cameroon.

² Technical Higher Training School, Department of Agriculture, Ebolowa, University of Yaoundé 1, Cameroon.

³ University of Douala, Faculty of science, Laboratory of Biotechnology, Douala, Cameroon.

⁴ Institute of Agricultural Research for Development (IRAD), Yaoundé, Cameroon.

World Journal of Advanced Research and Reviews, 2021, 11(02), 020–030

Publication history: Received on 07 June 2021; revised on 27 July 2021; accepted on 30 July 2021

Article DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.11.2.0318>

Abstract

Asian rust caused by *Phakopsora pachirhizi*, which is a major constraint to production of soybean, causing 90% yield losses in field. Synthetic fungicides used to control this disease are environmentally degrading and have negative impact on the health of producers and consumers. The use of resistant soybean genotypes can be an effective control alternative. The aim of this work is to evaluate the tolerance of soybean varieties to Asian rust disease under natural conditions. Forty-three soybean varieties were screened using a completely randomized block design with three replicate. Incidence and severity of disease at 6, 8 and 10 weeks after sowing (WAS) and yields were evaluated. Results show that disease incidence of Asian rust was significantly higher in the local variety R3 (16.67%; 29.63%; 75.93%) at 6, 8 and 10 WAS respectively. At 6 and 8 WAS severity of disease was higher in local variety R3 (21.17% and 24.14% respectively). The variety TGX-2010-12F has the highest yield (1.17 t ha⁻¹) than the local variety R3 (0.17 t ha⁻¹). Principal component analysis realized with incidence, severity of disease at 6, 8, 10 WAS and yield shows that 12 varieties are highly susceptible to Asian rust, 12 varieties are moderately resistant, and 19 varieties are susceptible. This study shows that Asian rust attacks all soybean varieties in the field. Moderately resistant varieties, can be advised to growers with appropriate protection methods or be subject to varietal improvement through genetic techniques.

Keywords: Screening; Varieties; Asian rust; Resistance; Glycine max; Yield

1. Introduction

Soybean (*Glycine max* L.) is an annual plant belonging to the Fabaceae family. Originally from East Asia, soybean is cultivated for its seeds which are very rich in proteins (30 to 40%), lipids (20%), carbohydrates (35% including 20% fiber), minerals and vitamins (5%) [1]. Proteins play a role in regulating blood cholesterol, thereby contributing to reducing the risk of contracting cardiovascular disease [2]. Most of the soybeans produced worldwide are crushed to be transformed either into cake for animal feed, into oil for human consumption or used as an agrofuel. After palm oil, soybean oil is the second most consumed oil in the world [3]. In addition, the plant's ability to fix atmospheric nitrogen contributes significantly to improving soil fertility [4].

* Corresponding author: Zachée Ambang

University of Yaoundé 1, Faculty of Science, Laboratory of Biotechnology and Environment, Phytopathology and Plant Protection Research Unit, Yaoundé, Cameroon.

Soybeans are present in more than 80 countries around the world, with the United States being the main producer, with production in 2019 estimated at around 85.6 million tons (Mt), and followed by Brazil with around 60.54 Mt and Argentina with around 36.37 Mt, [5]. On a global scale, statistics show that soybean is the first seed legume cultivated in the world and the fourth most important legume cultivated and consumed in Cameroon after groundnut, cowpea and bean [6]. In Cameroon, soybean is grown in his five agro-ecological zones. Despite the slight increase in yields observed, in 2018 and 2019 (1.3926 t/ha to 1.4450 t/ha) its production remains relatively low (23058 tonnes) [5] in relation to demand.

In spite of its socioeconomic importance and nutrition, soybean farming is facing several problems that largely explain the low yields. These problems include low soil fertility, pests and diseases [7]. Among the diseases, the most important are fungal origin, particularly Asian rust caused by *Phakopsora pachirhizi*, which is a major constraint to production, causing yield losses of up to 90% [8]. Disease control in the field is most often subject to the use of chemicals that are environmentally degrading and have negatively impact on the health of producers and consumers [9]. The scarcity of data referring to the resistance of (newly introduced) soybean varieties to Asian rust disease deserves special attention as an alternative to chemical control. In Cameroon, work on the susceptibility of these soybean varieties to Asian rust is very poorly documented. Only information on the adaptability of the varieties is available [10]. Therefore, it would be interesting to screen the forty-three soybean varieties newly introduced in Cameroon against Asian rust disease. The hypothesis being tested is that among the screened varieties, there is one with resistance to Asian rust disease in natural conditions. The general objective of this study is to identify soybean varieties showing resistance under the influence of Asian soybean rust in the locality of Mfou in Cameroon.

2. Material and methods

2.1. Materials

2.1.1. Study site

The work took place on a fallow land of 2 years old from May 26 to September 15, 2020 in the locality of Mfou. This locality is the capital of the Department of Mefou-et-Afamba, located in the Central Region of Cameroon. The geographical coordinates recorded using a GPS Garmin is: 3°45'27.048" North latitude; 11°37'38.532" East longitude, altitude ± 701m. This locality belongs to the agro-ecological zone 5 known as the bimodal rainfall zone. The average temperature is 25°C and the average annual rainfall is 1500-2000 mm [11, 12]. The prevailing climate is of the Guinean type. The soils are ferrallitic, acidic, clayey with a low nutrient retention capacity.

2.1.2. Plant Material

The experiment involved 43 soybean seeds varieties, including 38 exotic and 5 local varieties (Table 1). The exotic varieties are newly introduced through collaboration between the Institute of Agricultural Research for Development (IARD) and the University of Illinois at the United States. The local varieties are from the IRAD breeding of Foubot (TGX-1835-10E; TGX 2007-8F) and Garoua (R3; R2; TGX 1448-2F) originating from the International Institute of Tropical Agriculture (IITA).

Table 1 Different soybean varieties and their origin

Varieties	Source	Exotic/Local	Maturity (days)
TGx2002-23DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
Afayak	CSIR-SARI (Ghana)	exotic	90 – 100
SoungPungun	CSIR-SARI (Ghana)	exotic	90 – 100
TGx2001-24DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
TGx2001-10DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
JENGUMA	CSIR-SARI (Ghana)	exotic	90 – 100
TGx2014-19FM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
Maksoy 3N	U. Makerere (Uganda)	exotic	90 – 100
TGx2001-13DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100

TGx1987-62F	IITA (Nigeria)	exotic	90 – 100
Maksoy 2N	U. Makerere (Uganda)	exotic	90 – 100
S1140-5-4	SeedCo (Zimbabwe)	exotic	90 – 100
DPSB 8	KALRO (Kenya)	exotic	90 – 100
SNKGM011	Sensako (South Africa)	exotic	90 – 100
SCS-1	EIAR (Ethiopia)	exotic	90 – 100
S1150-5-22	SeedCo (Zimbabwe)	exotic	90 – 100
Clark 63K	EIAR (Ethiopia)	exotic	90 – 100
TGx2006-3F	IITA (Nigeria)	exotic	90 – 100
TGx2008-4F	IITA (Nigeria)	exotic	101 – 110
SC Saga	SeedCo (Zimbabwe)	exotic	90 – 100
TGx1991-22F	DARS (Malawi)	exotic	90 – 100
R3	IITA(Cameroun)	local	110-120
TGX-1835-10E	IITA(Cameroun)	local	90 – 100
R2	IITA(Cameroun)	local	110-120
TGx-2001-8DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
TGx-2001-1DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
TGx-2002-1DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
TGX1485-1D	IITA (Nigeria)	exotic	90 – 100
TGX2004-10F	IITA (Nigeria)	exotic	101 – 110
TGX 2011-7F	IITA(Nigeria)	exotic	90 – 100
TGX 2010-3F	IITA(Nigeria)	exotic	90 – 100
TGX 2007-11F	IITA (Nigeria)	exotic	101 – 110
TGX 2004-3F	IITA(Nigeria)	exotic	90 - 100
TGX 2010-15F	IITA(Nigeria)	exotic	90 - 100
TGX 2011-3F	IITA (Nigeria)	exotic	90 – 100
TGX 2008-2F	IITA(Nigeria)	exotic	101 – 110
TGX 2004-13F	IITA (Nigeria)	exotic	90 - 100
TGX 2007-8F	IITA(Cameroun)	local	90 – 100
TGX 1448-2F	IITA(Cameroun)	local	90 – 100
TGX 2010-12F	IITA (Nigeria)	exotic	101 – 110
TGX 2002-14DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
TGX 2001-14DM	IITA (Zambia)	exotic	90 – 100
TGX 2010-11F	IITA (Nigeria)	exotic	90 – 100

2.2. Methods

2.2.1. Experimental design and culture conditions

The experimental design was a completely randomized blocks with three repetitions. The blocks (22.5 m x 5 m) consisted of 43 plots or experimental units which represent the varieties. Each block is spaced by 1 m and 0.5 m paths separated the plots. The varieties are sown manually 3 days after ploughing, with a distance of 0.5 m between rows and 0.5 m between bunches (68 800 plant ha⁻¹). Each row consisted of 9 bunches, i.e. 18 plants per row. A sarco-buttag was carried out manually at 3 and 6 weeks after sowing (WAS). No fungal treatments or fertilizers were applied during the experiment. The contamination of the plot was done naturally by the pathogen.

2.2.2. Evaluation of the incidence and severity of Asian rust

Plants per plot was counted and noted. Diseased plants were identified and counted per experimental unit. The incidence of the disease was determined every two weeks according to the usual formula in plant pathology described by Tchoumakov and Zaharova [13]

$$I (\%) = \frac{\text{number of diseased plants}}{\text{Total number of plants per experimental unit}} \times 100$$

Table 2 Scale for estimating degrees of infection

Code	Severity (%)	Description	Grades
1	(0 %)	Total absence of symptoms	Immune/Disease Free
2	(0.6-1.99 %)	Infection occupying less than half the leaf area	Resistant
3	(2-6.99 %)	Infection covering two-quarters of the leaf area	Moderately Resistant
4	(7-17.9 %)	Infection covering more than two-quarters of the leaf area	Moderately Susceptible
5	(18-41.9 %)	Infection covering three - quarters of the leaf area	Susceptible
6	(42-78.5%)	Infection covering more three - quarters of the leaf area	Highly Susceptible

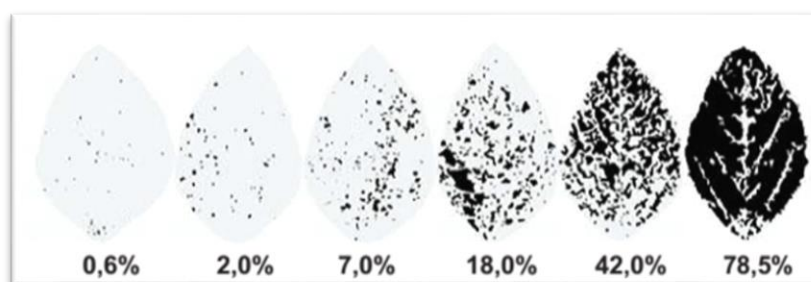


Figure 1 Diagrammatic scale of soybean (*Glycine max*) rust severity (percentage of diseased leaf area) [14]

The severity of the disease was taken every two weeks on ten plants labeled per treatment, the degrees of infection were attributed using the scale of 6 point (Fig.1) proposed by Godoy *et al.* [14] with some modification. The quantification of the disease was done by treatment and as a function of time. The severity of the disease was expressed by the formula described by Tchoumakov and Zaharova [13].

$$S = \sum (a \times b) / n \times 100$$

Where: $\sum (ab)$ = is the sum of the multiplications of the number of diseased plants, (a) = with the degree of corresponding infection, (b) = given in %, n= the number of diseased plants (Table 2).

2.2.3. Yield estimation of soybean varieties

The mature and half-dry pods of ten seedlings labeled by variety were harvested, then oven-dried (Selecta brand) until a constant weight was obtained. After hulling, the seeds obtained were weighed using a balance trade mark Sotorius (precision 0.001). Varietal yields were calculated according to the formula of Svecnjak *et al.* [15].

$$\text{Yield (t/ha)} = \frac{\text{PGEp} \times \text{N}}{\text{S}} \times 10000$$

Where: PGEp = weight of dry soybeans per plant, N = number of soybean plants per treated elementary plot, S = area of each elementary plot treated, 10000 m² = 1 hectare

2.2.4. Statistical analysis

Data on the epidemiological parameters (incidence and severity) and the yield of the different varieties were organized using the EXCEL 2010 spreadsheet (Microsoft office). These data were subjected to one-way analysis of variance (ANOVA) using R software version 3.5.1. The multiple comparisons of means were performed using the Last significant difference (LSD) test at $P < 0.05$ to separate them when the analysis of variance was significant. The principal component analysis and dendrograms were performed using the parameters incidence, severity and yield.

3. Results

3.1. Incidence of Asian soybean rust on screened varieties

Incidence of the disease of the 43 varieties observed during the data collection varies according to the varieties (Fig.2). At 6, 8 and 10 WAS ($P < 0.001$), the local variety R3 had the highest incidence of 16.67%; 29.63%; 75.93% respectively. It is followed by the variety S1150-5-22 with incidences of 12.96%; 25.93% at 6 and 8 WAS respectively. Varieties AFAYAK, JENGUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-2001-1DM, TGX-2001-80M and TGX-2007-11F have zero incidences at 6 WAS. In contrast, at 10 WAS, they had incidence of 16.67, 25.93, 50, 55.56, 37.04, 48.15, 46.30, and 59.26%, respectively.

3.2. Severity of Asian rust of screening varieties

The severity of the disease observed during the different data collection varies according to the varieties (Fig.3). Significant differences ($P < 0.001$) were recorded between the severities of the different varieties over time. The local variety R3 had the highest severity of 21.17% and 24.14% respectively at 6WAS and 8WAS, while at 6WAS, the varieties AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-1448-2E, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM, TGX-2001-80M and TGX-2007-11F had zero severity. At 10WAS the varietyTGX-2002-14DM had the highest severity of 59.26% compared to the variety TGX-2001-1DM which had the lowest severity of 10%

3.3. Yield of screened soybean varieties

Yield results for soybean varieties in natural infection conditions vary by variety (Fig.4). The analysis of variance found a significant difference between varieties ($P < 0.05$) on grain yields in t ha⁻¹. TGX-2010-12F (1.17 t ha⁻¹), TGX-2010-3F (0.78 t ha⁻¹) had the highest yields while R3 (0.17 t ha⁻¹) and R2 (0.19 t ha⁻¹) had the lowest yields. However, the variety TGX-2010-3F (0.78 t ha⁻¹) and CLARK-63K (0.779 t ha⁻¹) are not statistically different.

3.4. Multivariate analysis

3.4.1. Principal component analysis

S.6.WAS: severity six days after sowing; S.8.WAS: severity eight days after sowing; S.10.WAS: severity ten days after sowing; I.6.WAS: incidence six days after sowing; I.8.WAS: incidence eight days after sowing; I.10.WAS: incidence ten days after sowing.

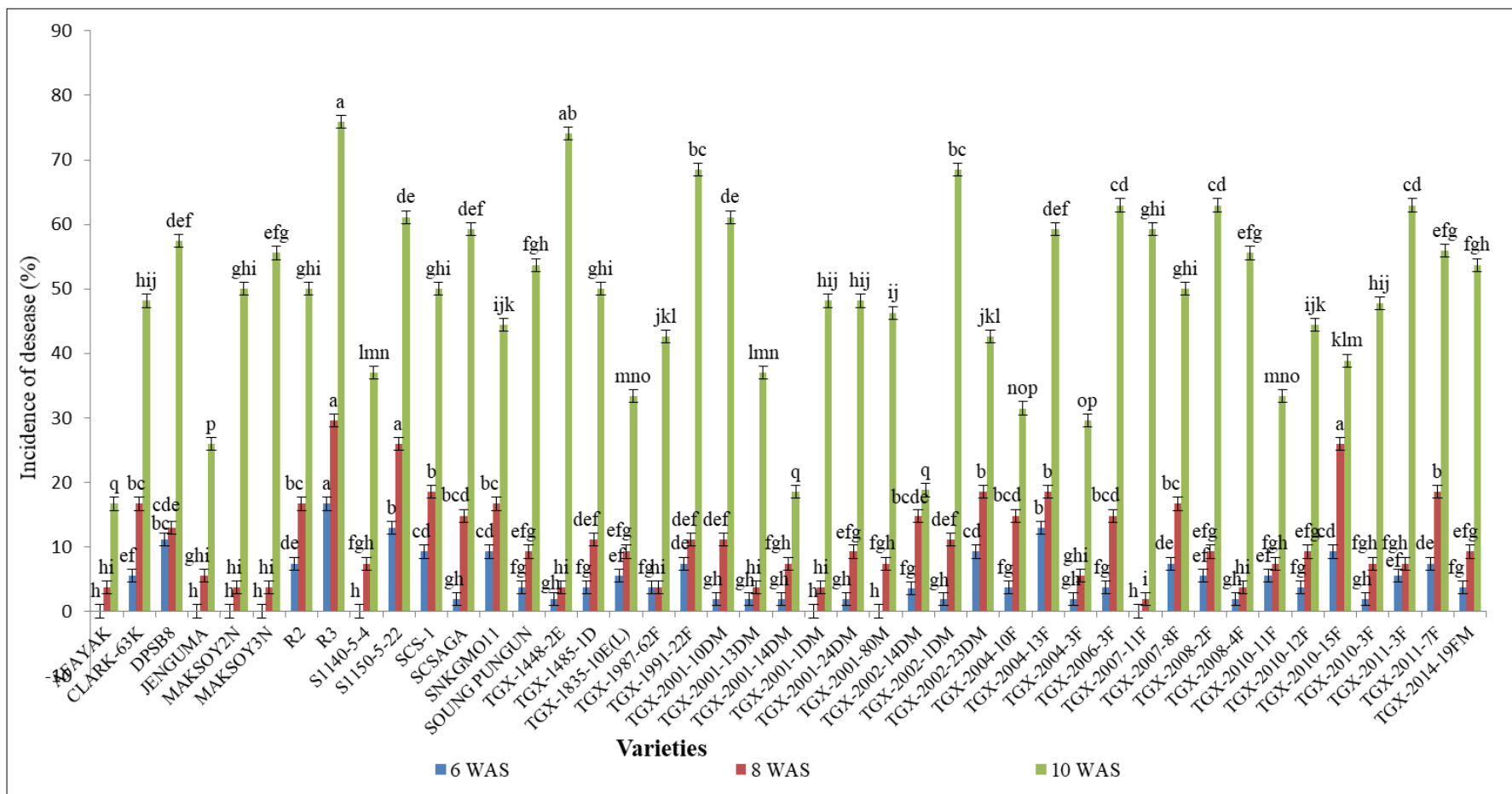


Figure 1 Incidence of Asian soybean rust in different varieties by time

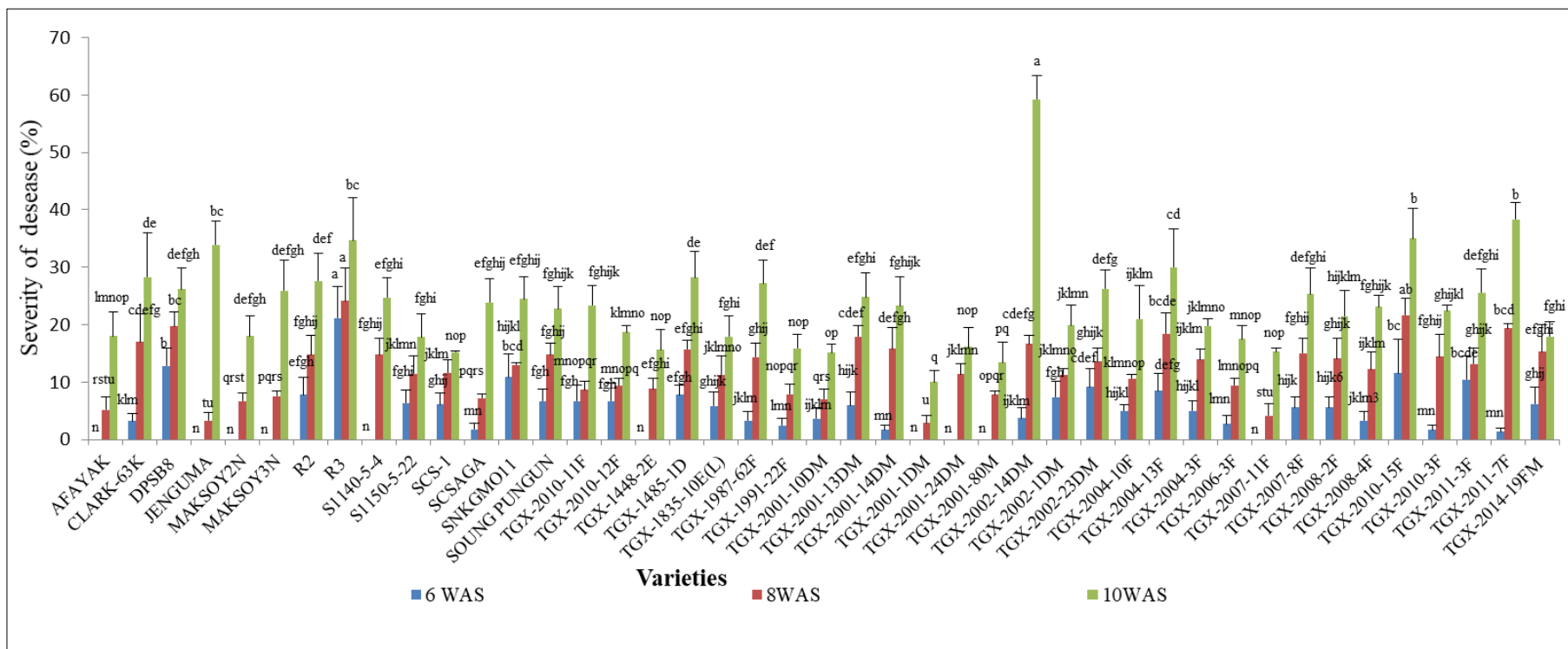


Figure 2 Severity of the Asian soybean rust on varieties by time

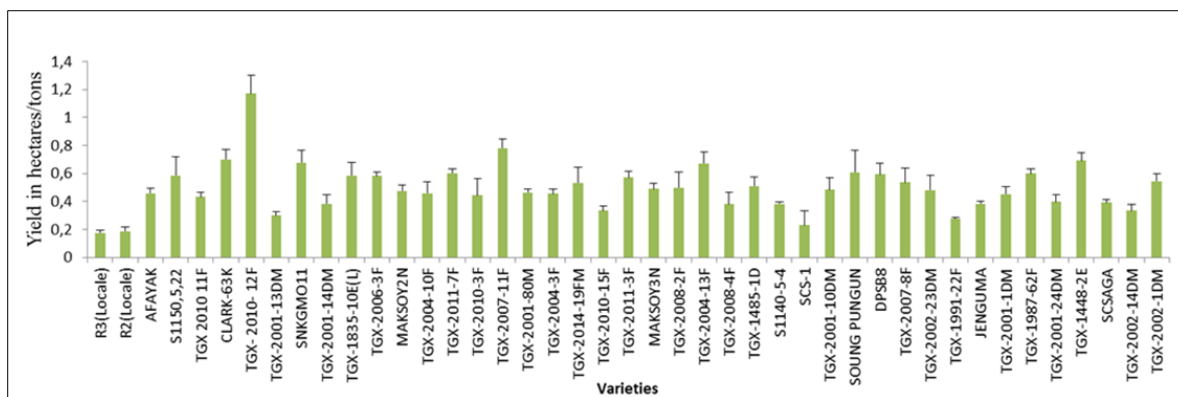


Figure 3 Yield of soybean varieties in natural infection condition

Principal component analysis (PCA) is used to group the screened soybean varieties on the basis of three variables namely incidence, severity and yield (Fig.5). The variables are well represented through the circle of correlations with a good rate of return of information on dimension 1 (46.58%) and dimension 2 (15.01%) for a total of 61.58%. Some varieties including TGX-2010-12F, TGX-2010-3F CLARK-63K and TGX-2002-23DM are close in Yield with low susceptibility to Asian soybean rust disease. Other varieties are the intermediate varieties and finally the varieties that show low yields in relation to their susceptibility to the disease.

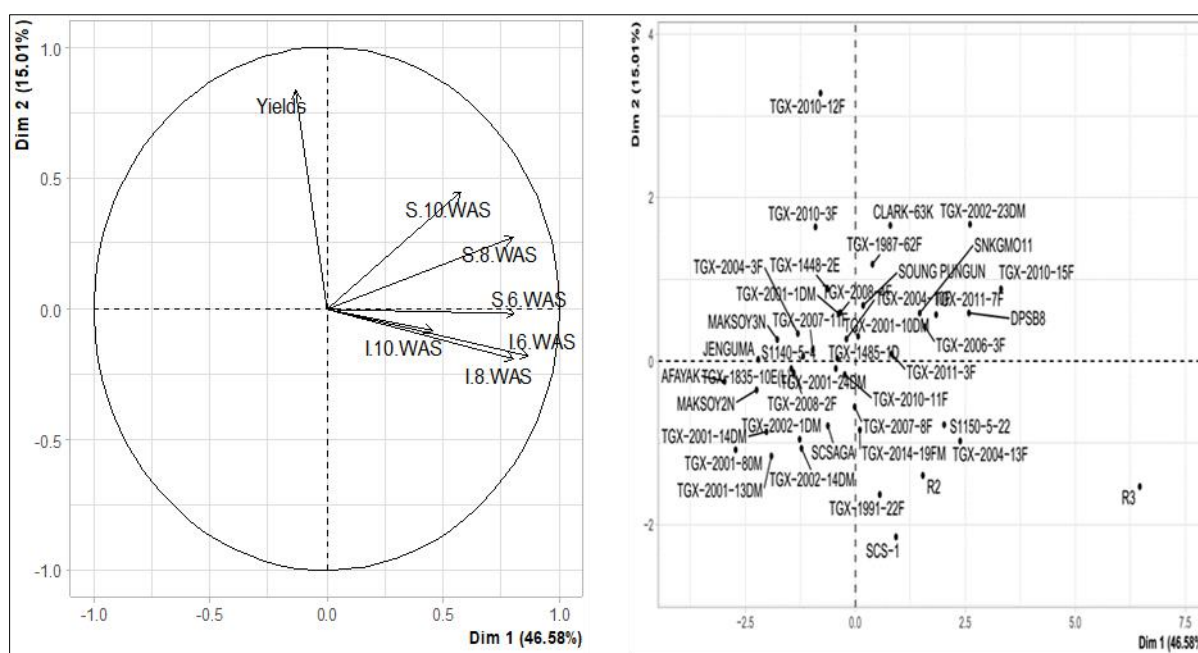


Figure 4 Principal Component analysis between soybean varieties and the studied parameters

3.4.2. Clustering of varieties according to epidemiological parameters and yield

Taking into account the different parameters of the study, namely incidence, severity and performance, a dendrogram was carried out (Fig.5). Three groups emerge from the classification. The first group consists of 12 varieties that are highly susceptible to Asian rust and have very low yields (R3, SCS-1, TGX-2002-23DM, R2, TGX-2014-19FM, TGX-2011-7F etc). The second group consists of 12 varieties which are moderately resistant to Asian rust and have very high yield. Among these are the varieties TGX-2010-12F, TGX-2010-3F CLARK-63K and TGX-2002-23DM, TGX-2007-11F, TGX-2008-4F, SOUNG POUNGUN. The third group consists of the varieties SCSAGA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, TGX-2002-80M, AFAYAK etc. which are susceptible and have a low yield.

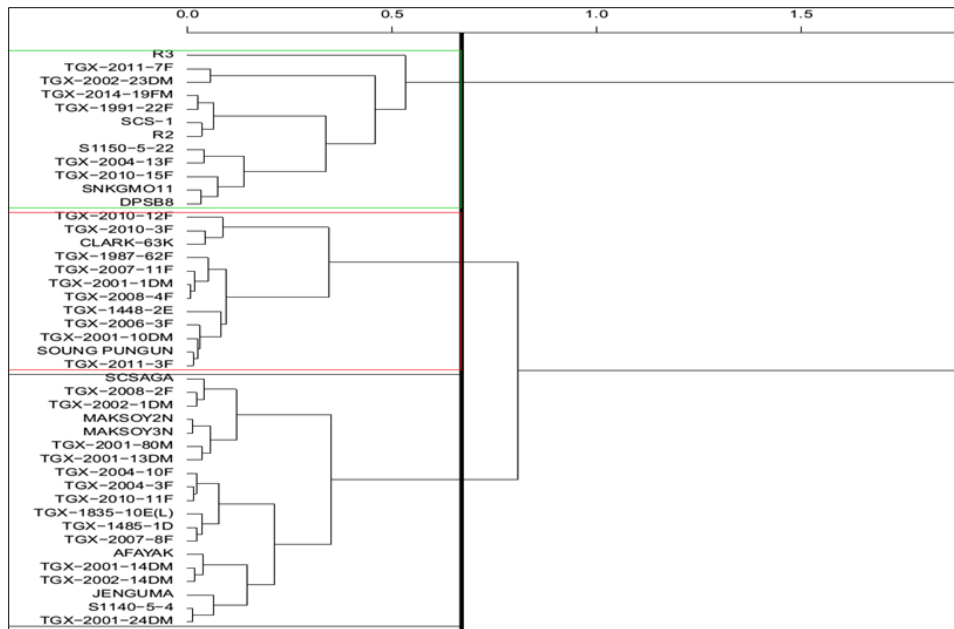


Figure 5 Dendrogram of screening varieties according to incidence, severity and yield

4. Discussion

Soybean is cultivated for its seeds that are very rich in protein, fat and trace elements [2]. Soybeans face Asian rust disease in the field, which can cause yield losses of up to 90% if no sanitary action is taken [8]. There is an extensive literature describing the use of synthetic pesticides to mitigate the effects of this disease on yield. This study predicts that newly introduced soybean varieties in Cameroon that have not been previously studied compared to three local varieties most commonly grown by farmers may have different susceptibility to the disease in the field. Varietal selection is most often used to control crop diseases and pests [16, 17]. As a result, the identification of soybean varieties with yield resistance to Asian soybean rust has been studied.

Results obtained on the incidence and severity of Asian soybean rust disease on the 43 varieties show that the disease varies between varieties over time. R3 and TGX-1448-2E had the highest incidence compared to the other varieties. The variation in incidence by variety over time could be due to the availability of inocula and different host-variety interactions. Mahesha *et al.* [18] working on the evaluation of 204 soybean genotypes under controlled conditions against major diseases reported several genotypes with multiple sources of resistance. This could also be due to favorable climatic conditions (increased wind intensity, rainfall) that favour successive natural inoculation. Indeed, Luck *et al.* [19] demonstrated that the increase in climatic and meteorological events accentuates the dispersion of *phakospora pachyrhizi* spores (the causal agent of rust) in the field. The high incidence in some varieties compared to others could be due to the susceptibility of these varieties compared to others, or to environmental conditions as presented by Schilling [20].

With regard to severity, the highest values are obtained in varieties TGX-2002-14DM and TGX-2011-7F, in contrast to varieties AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM, which show zero incidence and severity at 6 WAS. The variation in severity from one variety to another can be justified by the virulence of the strains and environmental conditions as disease development results from the dynamic interaction between the host plant, the pathogen and the environment [21]. The high severity of Asian rust in some varieties could also be due to the variability of pathogenic strains of *Phakospora pachyrhizi*. According to Ddamulira *et al.* [22], pathogen change is one of the causes of different strains in different agro-ecological zones. The fact that AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-1448-2E, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM varieties have zero severity at 6 WAS could be due to the presence of disease resistance genes in their genotypes. Indeed, work on the identification of multiple sources of disease resistance in cultivated and wild soybean has been undertaken by many researchers [23, 18, 24].

The yields obtained vary according to the varieties. The low yields recorded in general and in particular in varieties R3 and R2 could be due to disease pressure that would reduce the leaf area of the plants and consequently reduce photosynthetic activity [Ngueguim [25, 26]. It could also be related to the improved characteristics of the different

varieties, which would explain why some varieties have high (TGX-2010-12F) and some low yields (TGX-2010-12F). Senan *et al.* [27] working on the performance of six tomato cultivars against spoon leaf yellowing, bacterial wilt and root-knot nematodes showed that a difference in yield between varieties in the same season is due to the variety itself.

The dendrogram carried out according to the three parameters (incidence, severity and yield) allowed to group them in moderately resistant, susceptible and highly susceptible varieties. This could be justified by the approximation of the averages of the incidences, severities and yields of the different varieties. These results are different from those of Bachkar *et al.* [28] Zade *et al.* [29], which working on Screening of 36 soybean genotypes against mosaic virus, on Screening of 33 genotypes against alternaria leaf spot disease respectively obtained four group (resistant, moderately resistant moderately susceptible and susceptible) and those of Chavan *et al.* [30], which working on Screening of 40 soybean genotypes against *Colletotrichum truncatum* group them in moderately resistant, moderately susceptible, susceptible and highly susceptible.

5. Conclusion

The main objective of this study was to evaluate the susceptibility of 43 soybean varieties under natural infection conditions against Asian soybean rust on yield. It was found that variety R3 and TGX-1448-2E had the highest incidence. Varieties TGX-2002-14DM and TGX-2011-7F show the highest severity to Asian rust disease at 10WAS; unlike varieties AFAYAK, JENUMA, MAKSOY2N, MAKSOY3N, S1140-5-4, TGX-1448-2E, TGX-2001-1DM, TGX-2001-24DM which have zero incidence and severity at 6WAS. Varieties TGX-2010-12F (1.17 t/ha), TGX-2010-3F (0.78 t/ha) have the highest yields, unlike variety R3 (0.17t/ha.). The dendrogram has allowed to group them into highly susceptible (R3, SCS-1), moderately resistant (TGX-2010-12F, TGX-2010-3F) and susceptible (AFAYAK, TGX-1835-10E) varieties. These moderately resistant varieties, can be advised to growers with appropriate protection methods or be subject to varietal improvement through genetic techniques.

Compliance with ethical standards

Acknowledgments

Thanks to Institut of Agricultural Research for Development (IARD) for the supplying of varieties, to the laboratory of Biotechnology and Environment, Phytopathology and Plant Protection of de University of Yaoundé 1 and all Authors for their contributions.

Disclosure of conflict of interest

The authors: Gbaporo Gbaporo F.C, Heu A, Mboussi SB, Ngatsi Zemko P, Kuate Tueguem WN, Dida Lontsi SL, Kamtchoum S, Ambang zachée declare that they have no conflict of interest.

References

- [1] Jacques BB. SOYBEAN. 2010. www.sante-vivante.fr 1/21
- [2] Collomb V, Mayor M. Soybeans, the queen of vegetable? Geneva School of Health, Dietetics. 2007; 4.
- [3] STATISTA. Consumption of vegetable oils worldwide from 2013/14 to 2019/2020, by oil type; 2020
- [4] Saïdou A, Kossou D, Acakpo C, Richards P, Kuyper WT. Effects of farmers' practices of fertilizer application and land use types on subsequent maize yield and nutrient uptake in Central Benin. *Int. J. Biol. and Ch. Sci.* 2012; 6(1): 363-376.
- [5] FAO. FAOSTAT Data base results. Food and Agriculture Organization (FAO). Rome: 2020 Faostat. <https://Faostat.fao.org>.
- [6] Kouebou CP, Achu M, Nzali S, Machawe C, Bonglainsin J, Kamda A, Djiele P, Yadang G, Ponka R, Nghoh NG, Nkouam G, Teugwa C, Kana Sop MMA. Review of composition studies of Cameroon traditional dishes: Macronutrients and minerals. *Food Ch.* 2013; 17.
- [7] Wagara IN, Mwang OAW, Kimenju JW, Buruchara RA, Kimani PM. Reaction of selected common bean genotypes to physiological races of *Phaeoisariopsis griseola* occurring in Kenya. *Afri. Crop Sci. J.* 2011; 19(4): 343 – 355.

- [8] Giller KE, Dashiell KE . *Glycine max* (L) Merrill. Fiche de protabase. In: Van der Vossen, HAM, Mkamilo, GS (Eds) PROTA (Plant Ressources of Tropical Africa/ Ressources Végétales de l’Afrique Tropicale). Wageningen, Pays-Bas 2007; 17.
- [9] Ben-Dov Y, Hogson C. Soft Scale Insects: Their Biology, Natural Enemies and Control. E. Sci. Am. 1997.
- [10] USAID. Soybean Innovation Lab to introduce tropically-adapted soybean to several *Pan-African Trials*. 2019.
- [11] Santoir C, Bopda A. Regional Atlas South Cameroon. Office for Scientific Research Overseas, Paris (France). 1995.
- [12] Fomekong A, Messi J, Kekeunou S, Tamesse JL. Development, morphology and reproduction of *Coridius xanthopterus*, pest of cucumbers *Cucumeropsis mannii* in southern Cameroon. Ent. Faun. 2010; 62: 153-163.
- [13] Tchoumakov A, zaharova. Statistic of disease development. Disease damages caused in crop production. Agroprom Izdat, Moscou. 1990; 53.
- [14] Godoy C, Koga LJ, Canteri MG. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. Fitopatologia Brasileira. 2006; 31: 063-068.
- [15] Svecnjak Z, Varga B, Butorac J. Yield Components of Apical and Subapical Ear contributing to the Grain yield Responses of Prolific Maize at High and Low Plant Populations. J.of Agro. And Crop Sci. 2006; 192: 37- 42.
- [16] Acquaah G. Principles of plant genetics and breeding. 1st (Ed). Blackwell publishing, malden. USA. 2007; PP 109-120
- [17] Ngatsi ZP, Ndongo B, Kutnjem D, Djieto-Lordon C. Crop genotype and stem cutting portion affect infestation pressure of the cassava root scale *Stictococcus vayssierei* Richard (Hemiptera: Stictococcidae) in a rainforest in Cameroon. Phytoparasitica. 2020; 48: 629-641.
- [18] Mahesha B, Patil PV, Nandini B. Identification of multiple disease resistance sources in soybean. Crop Res. 2009; 37: 213- 216.
- [19] Luck J, Spackman M, Freeman A, Trębicki P, Griffiths W, Finlay K, Chakraborty S. Climate change and diseases of food crops. Plant Pathol. 2011; 60: 113-121.
- [20] Schilling R. Peanuts in tropical Africa. 15th Ed. Maisonneuve ET Larose rue Victor Cousin, F 75005 PARIS. 1996.
- [21] Adhikari TB, Mew TW, Teng PS. Progress of bacterial blight on rice cultivars carrying different Xa genes for resistance in the field. Plant Dis. 1994; 78: 73-77.
- [22] Ddamulira G, Mukankusi C, Ochwo-Ssemakula M, Edema R, Sseruwagi P, Gepts P. Distribution and Variability of *Pseudocercospora griseola* in Uganda. J. agri. sci. 2014 6(6): 16–29.
- [23] Mahesha B, Patil PV. Evaluation of soybean genotypes for multiple disease resistance. Soy. Res. 2007; 5: 75-79.
- [24] Ingle YV, Chandankar GD, Patil P, Patil CU. Evaluation of advance lines of soybean for resistance to major diseases under natural field condition. Ind. J. Agri. Res. 2016; 50(1): 84-87.
- [25] Djeugap FJ, Mefire M H, Nguefack J, Nguenguim M, Fontem DA. Varietal effect and fungicide treatment on the severity of angular spot disease and the yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in West Cameroon. Int. J. Biol. and Ch. Sci. 2014; 8(3): 1221 – 1233.
- [26] Nguenguim M, Mekontchou T, Fobasso M, Nounamo L. Influence of time of planting on yield and grain quality of bean genotypes grown on an andosol in the Western Highlands of Cameroun. Afri. Crop Sci. J. 2011; 19(4): 247-254.
- [27] Senan S, Mamadou D, Daouda D, Tschannen A, Girardin O. Performance of six cultivars of *Lycopersicon esculentum* Mills tomatoes against leaf spoon yellows, bacterial wilt and root-knot nematodes 1. Sci. Nat. 2007; 4(2): 123 – 130.
- [28] Bachkar CB, Balgude YS, Shinde PB, Deokar CD. Screening of soybean genotypes against soybean mosaic virus under natural and glass house conditions. Int. J. Chi. Sturdies. 2019; 7(1): 2267-2269
- [29] Zade SB, Ingle YV, Ghuge AS, Wasule DL. Screening of soybean genotypes for resistance against alternaria leaf spot disease. J. Sci. Agri. And Eng. 2018; (8): 198-199.
- [30] Chavan SS, Shinde DA, Kadam AM. Screening of soybean genotypes against *Colletotrichum*. J. pharma. And phyto. 2018; 1: 2972-2974.



Official publication of Pakistan Phytopathological Society
Pakistan Journal of Phytopathology

ISSN: 1019-763X (Print), 2305-0284 (Online)

<http://www.pakps.com>



PHENOTYPIC CHARACTERIZATION OF SOME ISOLATES OF *PHAKOPSORA PACHYRHIZI* IN CAMEROON

^aFabrice C. G. Gbaporo, ^{a,b}Angèle P. Ndogho, ^aSylvère L. L. Dida, ^aPatrice Z. Ngatsi, ^aCédrik B. W. Chedjou, ^aZachée Ambang*

^a Department of Plant Biology, Faculty of Science, Laboratory of Biotechnology and Environment, Phytopathology and Plant Protection Research Unit, University of Yaoundé 1, Yaoundé-Cameroon.

^b Department of plant Science, Faculty of Science, University of Buea,

ABSTRACT

The development of a rational and efficient control strategy against Asian rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* requires knowledge of the pathogenicity and local variability of the pathogen. The general objective of this study was to phenotypically characterize some isolates of *P. pachyrhizi* in Cameroon. In five agro-ecological zones (AEZ), 34 isolates of *P. pachyrhizi* were collected from diseased leaflet samples of soybean taken in the field. The length (L) and width (w) of the phenotypic forms of different uredospores of the isolates obtained were observed and measured under the light microscope. The length to width ratio (L/w) was calculated and the isolates aggressiveness was evaluated. Microscopic observation revealed seven different uredospore shapes including two new ones (seedlike and angular). Uredospore lengths ranged from 25.40 to 27.64 µm; widths from 16.64 to 19.61 µm; and L/w ratio from 1.45 to 1.57. The pathogenicity test on detached leaflets showed that the *P. pachyrhizi* isolates obtained were pathogenic with varying degrees of aggressiveness at 14 days after inoculation (DAI). The most aggressive isolates were obtained in AEZ II (GA1, WA and MB with aggressiveness of 84; 84.33 and 76.67 % respectively), AEZ III (BAM, 84 %) and AEZ V (MF2, 79.33 %). These morphological characters and different degrees of aggressiveness reveal a great variability of *P. pachyrhizi* uredospores in Cameroon.

Keywords: aggressiveness, Asian rust, *Glycine max* L., phenotypic characterization.

INTRODUCTION

Phakopsora pachyrhizi Sydow & Syd is the fungus responsible for Asian rust, which is one of the most dreaded diseases of soybean (*Glycine max* L.) in the world (Ibiam *et al.*, 2014). In Africa and in Cameroon in particular, *P. pachyrhizi* constitutes a major constraint to soybean production. Belonging to the large class of Basidiomycetes, family Phakopsoraceae (Ono *et al.*, 1992), *P. pachyrhizi* infects 95 species in 42 legume genera in the natural conditions (Hartman and Wang, 1992). *P. pachyrhizi* grows at temperatures between 15 and 28°C. It is a biotrophic fungus that grows and fruits

only on living plant fragments (Blum *et al.*, 2015). Uredospores of *P. pachyrhizi* move readily during the rainy season and high humidity periods (Hartman *et al.*, 2011). *P. pachyrhizi* attacks the aerial part of the plant resulting in reduced green leaf area, decreased photosynthetic activity, premature defoliation and immature seeds (Kumudini *et al.*, 2008). Huge losses are then estimated to be between 10 and 90% in mixed cropping, between 10 and 100% in monoculture for Africa in general and 80% for Cameroon in particular (Hartman *et al.*, 1991; Akinsanmi *et al.*, 2001). It was first observed in Japan in 1902 and since then has been found in most soybean producing countries (Hartman *et al.*, 2011; Murithi *et al.*, 2015). This pathogen was observed in Cameroon in 2005 (Levy, 2005).

Studies on the characterization of *P. pachyrhizi* found the variability in virulence depending on their reaction on different hosts (Bonde *et al.*, 2006; Miles

Submitted: April 11, 2022

Revised: May 23, 2022

Accepted for Publication: June 03, 2022

* Corresponding Author:

Email: zachambang@yahoo.fr

© 2017 Pak. J. Phytopathol. All rights reserved.

et al., 2006; Pham *et al.*, 2009). The aggressiveness of *P. pachyrhizi* population for a given geographic locality depends on the isolates (Murithi *et al.*, 2017). Indeed, Lin. (1966) describing six isolates of *P. pachyrhizi* in Taiwan demonstrated that virulence depends of isolate. In the world, a variability of *P. pachyrhizi* isolates have been described including 18 isolates in Japan (Yamaoka *et al.*, 2002, 2014); 3 isolates in Brazil (Yamanaka *et al.*, 2010) and the United States of America (Twizeyimana and Hartmann, 2012). In Africa 17 isolates have been described with the most virulent isolate obtained in South Africa (Murithi *et al.*, 2017). Seven resistance genes to *P. pachyrhizi* have been identified in soybean (Rpp1, Rpp2, Rpp3, Rpp4, Rpp5, Rpp6 and Rpp7) and known to confer resistance to specific isolates of the pathogen (Garcia *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2012). However, new pathotypes of *P. pachyrhizi* are emerging due to selection pressure. In Cameroon, very little information regarding the characterization

of *P. pachyrhizi* isolates is available to date. The phenotypic characterization of *P. pachyrhizi* isolates at the local level remains therefore essential for the development of a rational and efficient control strategy (Schiffers and Moreira, 2011; Cooke *et al.*, 2012). The hypothesis tested in this work is that the knowledge of the virulence of macroscopic and morphometric forms of *P. pachyrhizi* pathotypes varies from one agro-ecological zone to another. The objective of this study is to describe the phenotypic characters of some isolates of *P. pachyrhizi* in Cameroon.

MATERIALS AND METHODS

Study area: Samples were collected at 23 sites in the five agro-ecological (AEZ) zones of Cameroon (Table 1). Where AEZ I corresponds to Sudano-Sahelian zone; AEZ II to Guinean high savannas; AEZ III to western highlands; AEZ IV to Humid forests with monomodal rainfall; AEZ V to Humid forests with bimodal rainfall. These coordinates were used to draw up a sampling map showing the sites by agro-ecological zone (Figure 1).

Table 1. Sampling sites in each agro-ecological zone (AEZ)

AEZ	localities	Longitude	Latitude	Altitude
AEZ I	Tokobere	14°8'39,876''	10°52'7,338''	443 m
	Mokolo	13°51'41,88''	10°43'15,846''	779 m
	soukoudou	13°51'56,502'',	9°50'34,776''	378 m
	Sanguere	13°27'27,366''	9°16'16,404''	225 m
	Kodec	14°24'35,67''	10°39'9,318''	369 m
AEZ II	Mbe	13°36'7,626''	7°51'7,344''	582 m
	Wack II	13°33'7,53''	7°41'16,158''	669 m
	Ngaoundéré I	13°60'4,97''	7°34'7,63	1124 m
	Ngaoundéré II	13°55'9,75''	7°29'8,60''	1124 m
	Ganganssoua	13°46'18,522'',	7°31'50,346'',	1116 m
AEZ III	Bamenda	10°8'32,892''	5°56'43,656''	1264 m
	Mbouda	10°14'48,444''	5°38'9,834''	1416 m
	Bangangté	10°32'15,33''	5°8'42,462''	12943 m
	Bafoussam	10°26'44,154''	5°27'19,884''	1493 m
	Santchou	9°59'8,304''	5°14'53,178''	719 m
AEZ IV	Lala	9°48'2,810'',	4°79'7,739''	143 m
	Pendja	9°41'34,458	4°38'28,272'',	1700 m
AEZ V	Mfou	11°37'39,06'',	3°45'26,664''	699 m
	Mbalmayo	11°30'48,756''	3°32'37,02''	670 m
	Bafia	11°13'59,592''	4°44'27,756''	483 m
	Fourgerole	11°33'42,114''	3°54'39,66''	694 m
	Batchenga	11°41'28,842''	4°17'11,82''	508 m
Nkolbisson	11°27'28,15''	3°52'10,56''	732 m	

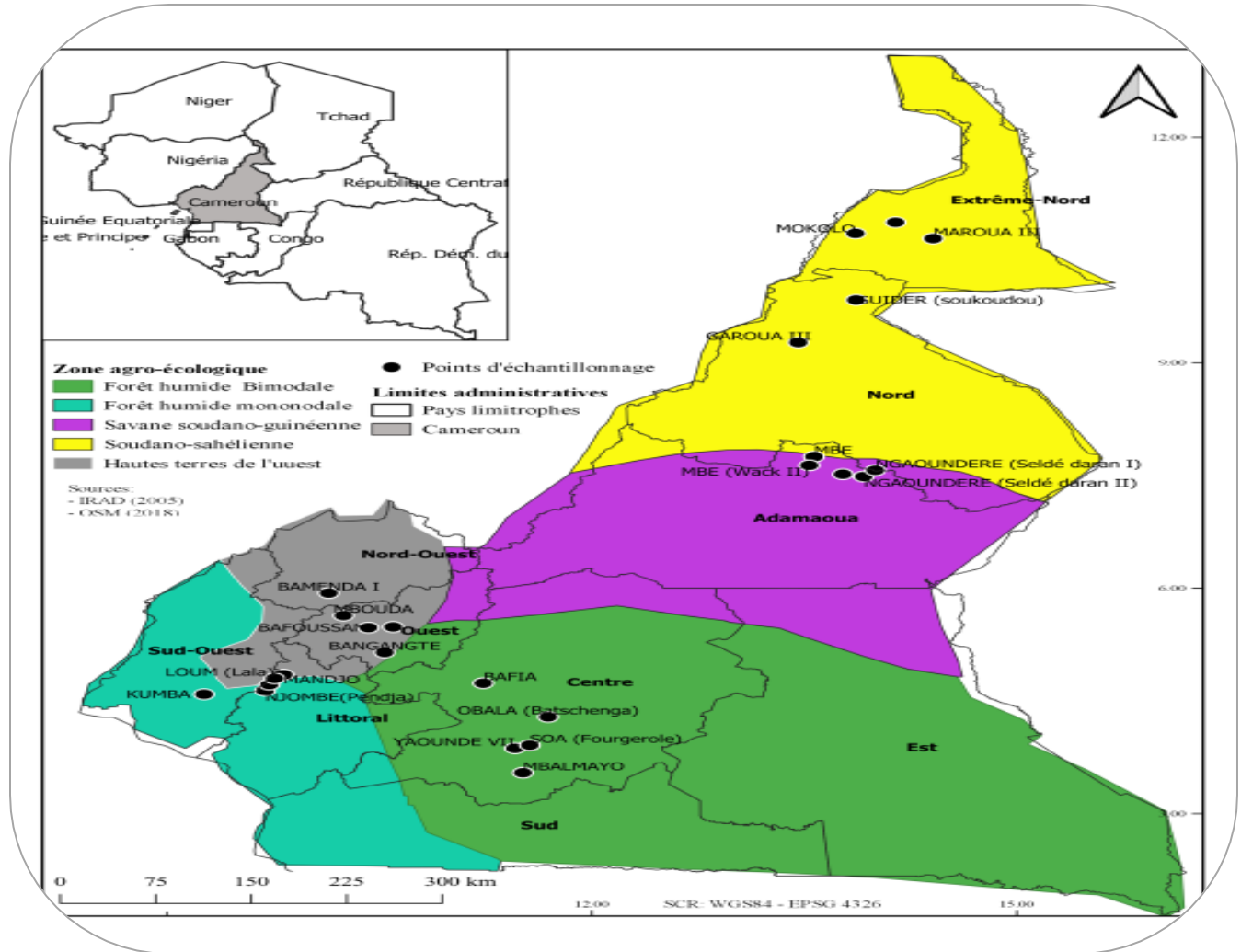


Figure 1. Map of Cameroon showing the sampling sites
Collection of samples and naming of isolates: Diseased plants were identified by visual observation of symptoms and fruiting bodies (pustules) on the lower part of diseased leaves (Ambang *et al.*, 2008; Renard and Foucart, 2008). These diseased leaflets were detached from the plant by pruning shears and inserted into envelopes, then transported to the laboratory. A total of 45 samples were collected from the five agro-ecological zones of Cameroon (Table 2). These samples were collected at a distance of more than 7 km from one site to another.

Isolation of *Phakopsora pachyrhizi* isolates: The pustules present on the lower parts of the diseased leaflet samples transported to the laboratory were carefully brushed separately with a fine brush into petri dishes to obtain isolates (Furtado *et al.*, 2008). These isolates were introduced into 20 ml of sterile distilled water. The suspensions of uredospore

obtained from isolates were inoculated for multiplication on detached soybean leaflets phenotypically healthy, introduced into petri dishes containing a moistened filter. After 12 days, pure and fruiting cultures of *Phakopsora pachyrhizi* were again separately brushed and introduced into eppendorf tubes and stored in a refrigerator at -80°C (Furtado *et al.*, 2008).

Morphological and morphometric description of uredospore of *Phakopsora pachyrhizi* isolates: The different isolates obtained were mounted with slide and coverslip. The morphologies of the different isolates according to the agro-ecological zone (AEZ) were obtained by microscopic observation. An optical microscope with a micrometer objective lens was used to measure the size of uredospore [length (L) and width (w)] at X 100 magnification. Then, the length/width ratio (L/w) was calculated for each AEZ (Duan *et al.*, 2008).

Table 2. Denomination and origins of *Phakopsora pachyrhizi* isolates

AEZ	Localities	Isolates	Varieties	Collected organs	
AEZ I	Tokobere	TO	TGX-1448-2E	leaves	
		SO	TGX-1448-2E	leaves	
	Sanguere	SA1	R3	leaves	
		SA2	R2	leaves	
		SA3	PANAMA	leaves	
Mokolo	MO	TGX-1448-2E	leaves		
AEZ II	Ngaoundérel	NGI	R2	leaves	
	NgaoundéreII	NGII	R2	leaves	
	Mbe	MB	R3	leaves	
	wack II	WA	TGX-1448-2E	leaves	
		GA1	TGX-1835-10E	leaves	
		GA2	TGX-1485-1D	leaves	
	Ganganssoua	GA3	TGX-1448-2E	leaves	
		BA1	TGX-1835-10E	leaves	
		BA2	LOCAL	leaves	
	AEZ III	Bangangté	BA3	TGX-1835-10E	leaves
Santchou			SAN	TGX-1835-10E	leaves
Bamenda			BAM	TGX-1838-10E	leaves
Diandam		DIA	TGX-1835-10E	leaves	
Mbouda		MBO	LOCAL	leaves	
AEZ IV		LALA	LAL	LOCAL	leaves
Pendja		PEN	LOCAL	leaves	
AEZ V		Mbalmayo	MBA1	TGX-1835-10E	leaves
	MBA2		TGX-1835-10E	leaves	
	Nkolbisson	NKO	TGX-1991-22F	leaves	
	Batchenga	BAT	TGX-1835-10E	leaves	
	Bafia	BAF	TGX-1835-10E	leaves	
		MF1	SCS-1	leaves	
		MF2	DPSB8	leaves	
		MF3	TGX-2014-19FM	leaves	
		MF4	S1140-5-4	leaves	
		MF5	SOUNG PUNGU	leaves	
		MF6	SNKGM011	leaves	
Fougerole	FOU	LOCAL	leaves		

Evaluation of the aggressiveness of *Phakopsora pachyrhizi* isolates: Detached leaflets of soybeans phenotypically healthy were collected in the field from the variety TGX-1835-10E from the Institute of Agricultural Research for Development in Foubot. These leaves were washed three times with distilled water and then placed in 90 mm petri dishes containing a moistened filter. A suspension of uredospore with a concentration of 3×10^2 Uredospores/ml per isolates previously calibrated using Malacez cell, was deposited

on the detached leaflets of the visible part (abaxial) in Petri dish using a micropipette at a rate of three drops of 20 μ l per leaflet. Three replicates were performed per isolate given a total of 99 petri dishes. The aggressiveness of the isolates was assessed by three-day intervals according to the scale of 1 to 5 previously defined from that established by Godoy *et al.* (2006), where:

1- Percentage varies from 1 to 20%; there is formation of pustules without appearance of lesions;

- 2- Percentage varies from 21 to 40%; appearance of pustules and lesions;
- 3- Percentage varies from 41 to 60%; appearance of pustules, lesions and yellowing around the pustules;
- 4- Percentage varies from 61 to 80%; appearance of pustules, lesions and formation of blackish spots around the pustules;
- 5- Percentage varies from 81 to 100%; total necrosis of the leaf

STATISTICAL ANALYSIS

The data obtained from the morphometric and aggressiveness of the different isolates were subjected to an analysis of variance (ANOVA) using the R software version 3.5.1 (R Development Core Team 2022). The difference between the various means was compared using the Duncan's test when normality test (Shapiro-Wilk test $P > 0.05$) and homogeneity (Levene's test $P > 0.05$) of variance were verified. When the data did not follow a normal distribution, the Kruskal-Wallis test was used ($P < 0.05$).

RESULTS

Identified Pathogen and number of isolates collected:

The technique of isolating and multiplying from pustules developed on detached leaflets in 12-day-old petri dishes yielded 34 isolates. The macroscopic (Figure 2A.) and microscopic (Figure 2B, 2C, 2D and 2E.) characteristics of the 34 isolates from the five agro-ecological zones were observed in the laboratory. The fungal fruiting bodies or uredinia (pustules), aged of 12 days in culture, were whitish and changed to brownish with age. The fungal fruiting bodies or uredinia developed in a solitary or grouped manner on the lesions and most of them were scattered on the lower part of the leaflets. Observed under a microscope (magnification $\times 100$), these mature uredinia released uredospores (Figure 2B.). These uredinia by germination (Figure 2D.) and thanks to their specialized appressorium structure which are typical characteristics of *P. pachyrhizi*, will be able to infect other plants. The structure of teliospore have also been observed (Figure 2E).

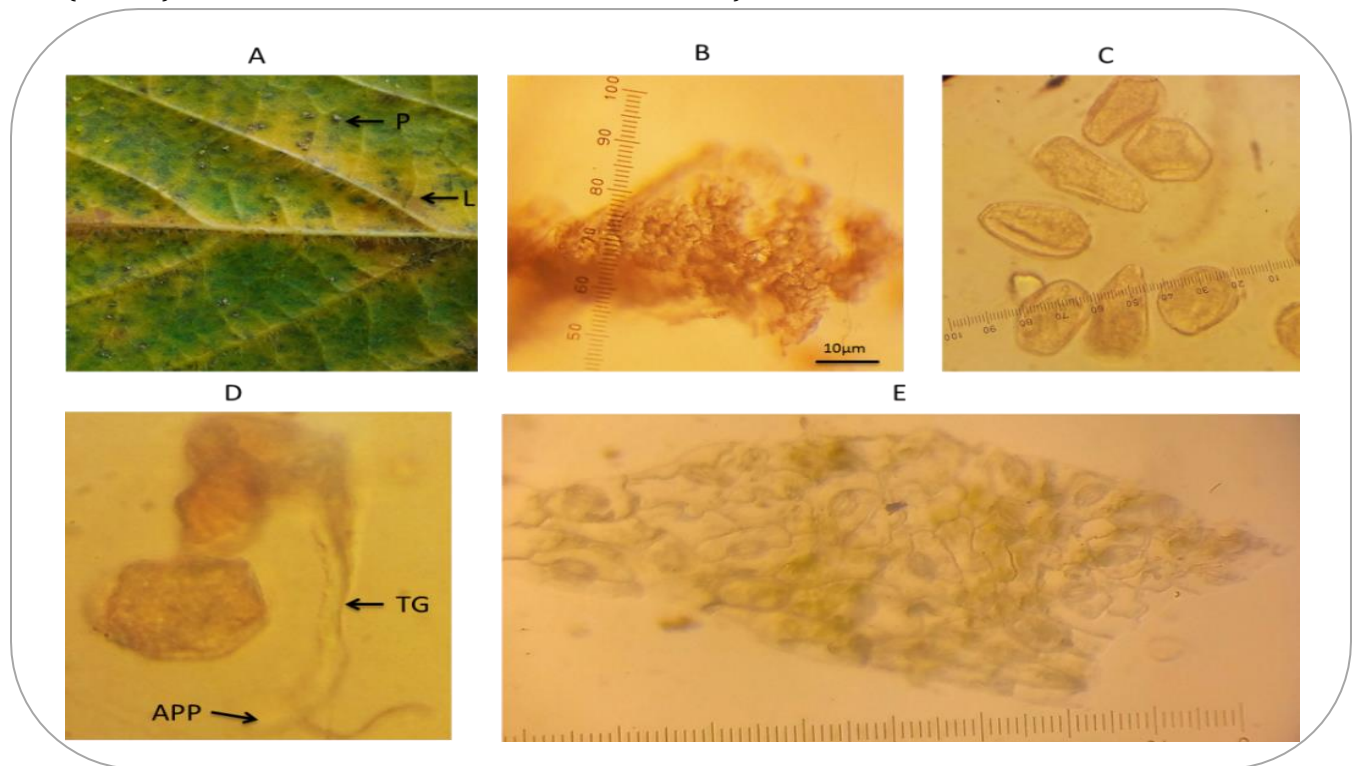


Figure 2. Macroscopic and microscopic characteristics of a pure culture of *Phakopsora pachyrhizi* isolates seen at X 100 magnification. (A) uredinia, (B) release of urediniospores, (C) urediniospores, (D) germination of uredospores (TG. germ tube, APP. appressorium), (E) teliospore structure.

Morphologies of uredospores: The forms of uredospores were much diversified. They varied very little according to localities and agro-ecological zones. A total of 07 forms were identified. Namely: the pepiform, elliptical, sub-spherical,

amygdaliform, globose, angular and sub-angular forms. These forms obtained, show a great variability of uredospores in Cameroon with the presence of two new forms; the seed-shaped (Figure 3B.) and angular (Figure 3F.).

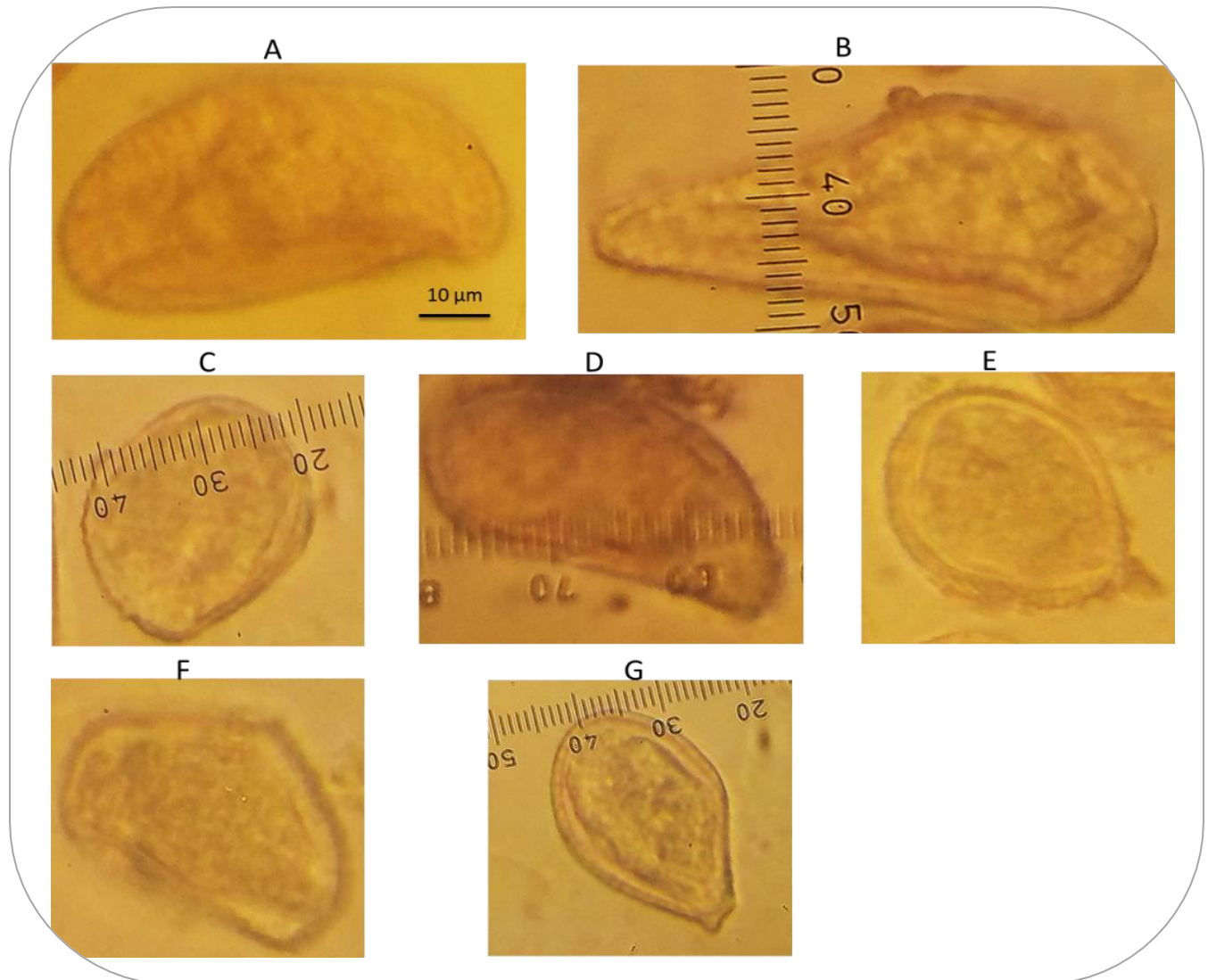


Figure 3. Forms of uredospores of *Phakopsora pachyrhizi* isolated in the five agro-ecological zones of Cameroon observed at X 100 magnification. (A) elliptical, (B) pepiniform, (C) sub-spherical, (D) amygdaliform, (E) globose, (F) angular (G) sub-angular

Morphometries of the uredospores of *Phakopsora pachyrhizi*:

The parameters lengths, widths, and ratio (L/w) of *P. pachyrhizi* uredospores did not differ significantly $P < 0.05$ between isolates from localities in AEZ I and between isolates from localities in AEZ IV. Uredospore lengths ranged from 23.92 to 28.08 µm; 24.96 to 27.04 µm and widths from 15.6 to 18.72 µm; 15.6 to 17.68 µm for AEZ I and IV respectively. Their ratios (L/w) ranged from 1.42 to 1.72 and from 1.57 to 1.6 respectively. A significant difference is recorded between isolates from AEZ II localities, between isolates from AEZ III localities and between isolates from AEZ V localities in terms of uredospores lengths and widths. AEZ lengths ranged from 26 to 35.6 µm; 26 to 29.12 µm;

26 to 36.40 µm and widths from 17.68 to 22.88 µm; 15.60 to 19.76 µm; 15.60 to 21.84 µm respectively. The ratios (L/w) did not differ significantly between isolates from locations in AEZ II and III, but varied significantly between isolates from locations in AEZ V. These ratios (L/w) ranged from 1.33 to 1.55; 1.28 to 1.58 and 1.25 to 2.08 respectively. The isolate from Mbalmayo1 has the highest L/w ratio of 2.08. In general, there is no significant difference between the lengths or L/w ratio according to the AEZ, but there are significant differences between the widths of AEZ II and the other AEZ. These lengths vary from 25.40 to 27.64 µm; widths from 16.64 to 19.61 µm and L/w ratio from 1.45 to 1.57 (Table 3).

Table 3. Morphometry of uredospores of *Phakopsora pachyrhizi* isolates

AEZ	localities	Uredospore lengths (L) in μm	Uredospore width (l) in μm	Ratio (L/l)
AEZ I	Tokobere	23.92 \pm 5.92a	15.60 \pm 3.67a	1.68 \pm 0.82a
	soukoudou	28.08 \pm 2.84a	17.68 \pm 2.84a	1.63 \pm 0.37a
	Sanguere 1	26.00 \pm 5.2a	18.72 \pm 2.84a	1.42 \pm 0.37a
	Mokolo	26.00 \pm 4.24a	18.20 \pm 3a	1.48 \pm 0.19a
	Sanguere 2	28.08 \pm 2.84a	18.72 \pm 2.84a	1.53 \pm 0.31a
	Sanguere 3	28.08 \pm 2.84a	16.64 \pm 2.32a	1.72 \pm 0.30a
	Average		26.69 \pm 1.69a	17.30 \pm 1.06b
AEZ II	Ngaoundéré 1	27.04 \pm 4.35 b	22.88 \pm 2.84a	1.19 \pm 0.20a
	Ngaoundéré 2	28.08 \pm 2.84b	18.72 \pm 2.84ab	1.53 \pm 0.31a
	Mbe	22.88 \pm 2.84b	17.68 \pm 2.84b	1.33 \pm 0.33a
	wack 2	27.04 \pm 4.35b	18.72 \pm 5.92ab	1.55 \pm 0.44a
	Ganganssoua 1	35.36 \pm 2.32a	22.88 \pm 2.84a	1.56 \pm 0.17a
	Ganganssoua 2	26.00 \pm 5.2b	17.68 \pm 2.84b	1.50 \pm 37a
	Ganganssoua 3	29.12 \pm 6.97b	18.72 \pm 2.84ab	1.55 \pm 0.24a
Average		27.21 \pm 2.40a	19.61 \pm 2.28a	1.45 \pm 0.14a
AEZ III	Banganté 1	27.04 \pm 4.35a	17.68 \pm 2.84ab	1.57 \pm 0.39 a
	Banganté 2	21.84 \pm 2.32b	15.60 \pm 0.00b	1.40 \pm 0.14 a
	Banganté 3	26.00 \pm 0.0a	17.68 \pm 2.84ab	1.50 \pm 0.22 a
	Santchou	27.04 \pm 2.32a	17.68 \pm 2.84ab	1.55 \pm 0.18a
	Bamenda	26.00 \pm 3.67a	16.64 \pm 2.32ab	1.58 \pm 0.3a
	Diandam	20.80 \pm 3.67b	16.64 \pm 2.32ab	1.28 \pm 0.33a
	Mbouda	29.12 \pm 2.84	19.76 \pm 2.32a	1.48 \pm 0.14a
Average		25.40 \pm 2.99a	17.38 \pm 1.30b	1.48 \pm 0.1a
AEZ IV	Lala	27.04 \pm 2.32a	17.68 \pm 2.84a	1.57 \pm 0.31a
	Pendja	24.96 \pm 4.35a	15.60 \pm 0.00a	1.60 \pm 0.27a
Average		26.00 \pm 1.47a	16.64 \pm 1.47b	1.58 \pm 0.02a
AEZ V	Balmayo 1	36.40 \pm 3.67a	17.68 \pm 2.84abc	2.08 \pm 0.25a
	Mbalmayo 2	20.80 \pm 3.67c	16.64 \pm 2.32bc	1.25 \pm 0.14c
	Nkolbisson	27.04 \pm 2.32b	18.72 \pm 2.84abc	1.50 \pm 0.20bc
	Batchenga	28.08 \pm 2.84b	15.60 \pm 0.00c	1.80 \pm 0.18ab
	Bafia	26.00 \pm 3.67b	18.72 \pm 2.84abc	1.42 \pm 0.28bc
	Mfou 1	35.36 \pm 4.35a	19.76 \pm 2.32a	1.82 \pm 0.35ab
	Mfou 2	27.04 \pm 2.32b	21.84 \pm 2.32abc	1.25 \pm 0.17c
	Mfou 3	27.04 \pm 6.7b	18.72 \pm 2.84abc	1.45 \pm 0.29bc
	Mfou 4	28.08 \pm 2.84b	19.76 \pm 4.35abc	1.47 \pm 0.34bc
	Mfou 5	26.00 \pm 0.00b	19.76 \pm 2.32abc	1.33 \pm 0.18c
	Mfou 6	23.92 \pm 2.84bc	20.80 \pm 3.67ab	1.19 \pm 0.32c
	Fougerole	26.00 \pm 3.67b	18.72 \pm 2.84abc	1.43 \pm 0.39bc
Average		27.64 \pm 4.33a	18.21 \pm 1.04ab	1.49 \pm 0.26ab

P: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '*' 0.05. Values in each column with the same letters are not significantly different based on Duncan's test of probability at 0.05.

Aggressiveness of *Phakopsora pachyrhizi* isolates on detached soybean leaves: All the 34 isolates of *P. pachyrhizi* obtained induced disease on detached soybean leaflets in petri dishes. The uredin and lesions

observed were typically those of Asian rust. The degree of aggressiveness varied among isolates at 3, 6, 9, and 14 days after inoculation (DAI). At 14 days after inoculation, the degree of aggressiveness of isolates ranged as follow:

GA1 (84 %), WA (84.33 %), MB (76.67 %) in AEZ II; BAM (84 %) in AEZ III and MF2 (79.33 %) in AEZ V showing the highest degree of aggressiveness. The lowest degrees of aggressiveness were obtained with isolates MO (46 %), TO (52 %) belonging to AEZ I and isolate BA1 (50 %) belonging to AEZ III (Table 4.).

Table 4. Aggressiveness of the different isolates during the different data collection

Isolates	3 JAI	6 JAI	9 JAI	14 JAI
TO	8.33 ± 0.57mno	12.67 ± 1.15p	19.67 ± 3.78r	52 ± 6.24fgh
SO	14.67 ± 1.15fgh	19.67 ± 2.08op	28.67 ± 1.52opqr	59.33 ± 4.93ef
SA1	16 ± 1.0def	27.33 ± 2.08ghij	42.67 ± 3.21efg	55.67 ± 3.21fg
SA2	13 ± 1.73hij	26.67 ± 2.51hijk	33.33 ± 5.13klmno	53.33 ± 3.78fgh
SA3	10.67 ± 1.52jklm	24.67 ± 3.21jklm	38.67 ± 1.52ghi	66.33 ± 7.37de
MO	21.67 ± 1.52ab	31.33 ± 2.51cdef	43.67 ± 1.52ef	46.33 ± 6.50h
NG1	11.33 ± 2.08jkl	22.33 ± 2.30mnop	31.33 ± 3.21nopq	70.33 ± 2.08bcd
NG2	21.67 ± 1.15ab	28.33 ± 2.08fghi	40. ± 3fgh	72.33 ± 3.78bcd
MB	19 ± 1bc	35.67 ± 2.08abcd	45.33 ± 3.05cde	76.67 ± 3.05abc
WA	12.33 ± 2.08ijk	32.33 ± 2.51bcde	46 ± 2.0bcde	84.33 ± 5.13a
GA1	38.67 ± 1.15a	50.33 ± 2.88a	70 ± 3a	84 ± 5.29a cd
GA2	5 ± 1.7o	28.33 ± 1.52fghi	36.67 ± 3.21hijkl	70 ± 2cd
GA3	11 ± 1jklm	29 ± 1.73efg	35.33 ± 3.05ijklmn	66 ± 7de.
BA1	8.33 ± 1.52mno	21 ± 1.73nop	38 ± 2.64hij	50.67 ± 5.13bcd
BA2	17.67 ± 1.52cd	38 ± 1.73abc	44 ± 1.73def	75 ± 2.64gh
BA3	15 ± 1efg	40.67 ± 2.08ab	50 ± 2.64abc	73.67 ± 3.05bcd
SAN	8.67 ± 1.52lmno	25 ± 2jklm	42.67 ± 2.08efg	74.67 ± 2.30bcd
BAM	14.67 ± 1.52fgh	26 ± 1.73jkl	37 ± 4.35hijkl.	84 ± 5.56a
DIA	14.33 ± 0.51ghi	30.33 ± 1.52def	38 ± 1.73hij	73.33 ± 3.05bcd
MBO	16.33 ± 1.52def	28.67 ± 1.52fgh	36.33 ± 2.08ijklm	73.33 ± 2.51bcd
LAL	16.67 ± 1.52cde	24 ± 1.73lmno	33.67 ± 1.52lmno	67.67 ± 2.5cd
PEN	24 ± 1a	29.33 ± 1.52efg	44.67 ± 2.51cde	73.33 ± 4.16bcd
MBA1	17.67 ± 2.08cd	25.67 ± 1.15jkl	35.33 ± 1.52jklmn	72.33 ± 7.50bcd
MBA2	12.67 ± 1.51ijk	31 ± 2.64def	38 ± 2.64hij	70 ± 6.92cd
NKO	6.33 ± 1.52o	24.33 ± 2.08klmn	35.33 ± 1.52 jklmn	73 ± 3bcd
BAT	17.67 ± 2.51cd	22.33 ± 1ijkl	26 ± 2pqr	70.67 ± 1.52bcd
BAF	17.67 ± 1.52cd	26.33 ± 2.08mnop	55 ± 3ab	73.33 ± 2.88bcd
MF1	22.33 ± 2.08ab	39.33 ± 3.05ab	49.33 ± 3.05abcd	74.33 ± 3.51bcd
MF2	10 ± 1.0klmn	32.33 ± 2.30bcde	47.33 ± 2.51abcde	79.33 ± 2.51ab
MF3	14 ± 1ghi	25.67 ± 1.52jkl	37.33 ± 3.05hijk	71 ± 2bcd
MF4	31.67 ± 1.52a	41.33 ± 3.05ab	50.67 ± 4.16abc	66.33 ± 8.96 de
MF5	14.33 ± 1.52ghi	25 ± 2klm	32.33 ± 2.30mnop	71.33 ± 4.16bcd
MF6	17.33 ± 2.51cd	26.33 ± 1.52ijkl	32.67 ± 2.08mnop	71 ± 3.60bcd
FOU	7.67 ± 1.15no	17.33 ± 2.08p	24 ± 2.64qr	71.67 ± 3.05bcd

P: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '*' 0.05. Values in each column with the same letters are not significantly different based on the Kruskal-wallis and Duncan's test of probability ($P < 0.05$).

DISCUSSION

The phenotypic characterization and identification of *P. pachyrhizi* is necessary and essential for the development of a rational and effective control strategy (Bruno and Christine, 2011; Cooke *et al.*, 2012). This study reports the lack of information about the pathogen

at the local level and therefore the phenotypic characterization would present variants related to the isolates from the different AEZ. The results of the macroscopic and morphometric characterization of *P. pachyrhizi* isolates show a variability of morphological characters. Indeed, Bonde and Brown. (1980); Roxana *et*

al. (2016) working respectively on the morphological comparison of *P. pachyrhizi* isolates from different regions of the world and on the germination and infection of *P. pachyrhizi* under simulated environment of the central zone in Argentina obtained morphologies that vary from ovoid to ellipsoid.

In the present work, a total of 7 forms were identified, with the appearance of two new forms of uredospores of *P. pachyrhizi* in the different agro-ecological zones in Cameroon. The forms obtained show a great variability of *P. pachyrhizi* uredospores. Sachin *et al.* (2020) observed and identified three forms of *P. pachyrhizi* uredospores in different localities of Karnataka in India. Overall, the sizes of uredospores obtained from the AEZ showed no significant differences. Nevertheless, some significant differences exist between the widths. The lengths vary from 25.40 to 27.64 μm ; the widths from 16.64 to 19.61 μm and the ratio (L/w) from 1.45 to 1.57. The variations obtained could be due to the variability of the shapes present (Dida *et al.*, 2020). These results are in agreement with the work of Ono *et al.* (1992) who showed that the lengths of uredospores varied from (18 to 34 μm) and widths (15 to 24 μm). On the other hand, Igarashi *et al.* (2012) working on the comparative morphology between uredospores of agriculturally important species obtained lengths and widths ranging from 26 to 39 and 19 to 25 respectively.

P. pachyrhizi isolates obtained from the different AEZ were all found to be pathogenic with variability in aggressiveness among isolates. Isolates GA1, WA, MB, BAM and MF2 were more aggressive compared to isolates MO, TO and BA1. The variability in aggressiveness among isolates may be due to variability in virulence genes or to the fusion of germ tubes into germinating uredospores, creating a complex hyphae network, into which nuclei migrate to form the multinucleate hyphae as demonstrated by Vittal *et al.* (2012). Indeed, these authors demonstrated that the anastomosis and the formation of heterokaryons would be at the origin of the genetic variability of virulence genes in *P. pachyrhizi* populations. The variability of aggressiveness may also be a function of their reaction on different hosts as stated by Bonde *et al.* (2006); Miles *et al.* (2006) and Pham *et al.* (2009).

CONCLUSION

The general objective of this study was to characterize phenotypically the isolates of *P. pachyrhizi* in Cameroon. The results show a significant variation in the

morphological characters of *P. pachyrhizi* uredospores. Seven forms were observed with the appearance of two new forms. The pepiniforms and angular forms. These forms obtained show a great variability of uredospores of *P. pachyrhizi* in Cameroon. The lengths and ratio (L/w) of uredospores did not differ significantly between AEZ. However, there were significant differences between the widths of AEZ II and the other AEZ. The lengths varied from 25.40 to 27.64; the widths from 16.64 to 19.61 and the ratio (L/w) from 1.45 to 1.57. All 34 *P. pachyrhizi* isolates obtained were pathogenic with a degree of aggressiveness varying from an isolate to another at 14 days after inoculation. The most aggressive isolates were obtained in AEZ II (GA1, WA, and MB), AEZ III (BAM) and AEZ V (MF2).

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors thank the Laboratory of Biotechnology and Environment, Phytopathology and Plant Protection unit of de University of Yaoundé 1.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

Zachée Ambang, selected the scope of the work and reviews the manuscript. Fabrice Christian Gbaporo Gbaporo conduct the Lab experiments and writes the first draft of the manuscript. Patrice Zemko Ngatsi analyses data and review the manuscript. Sylvère Landry Lontsi Dida and Cédrik B. W. Chedjou, conduct manipulation in lab. Angèle Pégalepo Ndogho and Sylvère Landry Lontsi Dida read and review the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

REFERENCES

- Akinsanmi, O. A., J. L. Ladipo and P. O. Oyekan. 2001. First report of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Nigeria. *Plant Disease*, 85(1): 97-97.
- Ambang, Z., B. Ndongo, D. J. P. Ngoh, Y. Maho and G. Ntsomboh. 2008. Effect of mycorrhizal inoculum and urea fertilizer on diseases development and yield of groundnut crops (*Arachis hypogaea* L.). *African Journal of Biotechnology*, 7: 2823-2827.
- Blum, M. M. C., E. M. Reis, T. V. Franciei and R. Carlini. 2015. *In vitro* effect of substrate, temperature and photoperiod on *Phakopsora pachyrhizi* urediniospore germination and germ tube growth. *Summa Phytopathologica*, 41: 101-106
- Bonde, M. R. and M. F. Brown. 1980. Morphological comparison of isolates of *Phakopsora pachyrhizi* from different areas of the world. *Canadian Journal Microbial*, 26: 1443-1449.

- Bonde, M. R., N. E. Nester, C. N. Austin, C. L. Stone, R. D. Frederick, G. L. Hartman and M. R. Miles. 2006. Evaluation of virulence of *Phakopsora pachyrhizi* and *P.meibomia* isolates. *Plant Disease*, 90: 708-716
- Bruno, S. and M. Christine. 2011. Fondements de la protection des cultures. PIP c/o COLEACP, Bruxelles, 294.
- Cooke, D., L. M. Cano, S. Raffaele, R. A. Bain, L. R. Cooke, G. J. Etherington, K. L. Deahl, P. R. J. Birch, A. K. Lees and S. Kamoun. 2012. Genome analyses of an aggressive and invasive lineage of the Irish potato famine pathogen. *PLOS Pathogens*, 8: 2929-2940.
- Dida, S. D. L., H. Alain, D. F. Joseph, N. T. W. Kuate, B. Mbatkam, C.F.G. Gbaporo and Z. Ambang. 2020. Characterization of *Phytophthora infestans* Isolates from Two Potato Varieties in the Highlands Agro-Ecological Zone of Cameroon. *International Journal of Pathogen Research*, 5: 36-44
- Duan, C. H., M. B. Riley and S. N. Jeffers. 2008. Characterization of *Phytophthora cinnamomi* populations from ornamental plants in South Carolina, USA. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 41: 14-30.
- Fomekong, A., J. Messi, S. Kekeunou and J. L. Tamesse. 2010. Développement, morphologie et reproduction des *Coridius xanthopterus*, ravageur des concombres *Cucumeropsis mannii* dans le Sud Cameroun. *Entomologie Faunistique*, 62: 153-163
- Furtado, G. Q., S. A. M. Alve, A. B. C. Czermainski and J. N. S. Massola. 2008. Preservation of *Phakopsora pachyrhizi* Uredospores. *Journal of Phytopathology*, 156: 62-64
- Garcia, A., E. S. Calvo, R. A. D. Kuhl, A. Harada, D. M. Hiromoto and L. G. E. Vieria. 2008. Molecular mapping of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) resistance genes: discovery of a novel locus and alleles. *Theoretical Applied Genetics*, 117: 545-553
- Godoy, C. V., C. D. S. Seixas, R. M. Soares, F. C. Marcelino-Guimarães, M. C. Meyer and L.M. Costamilan. 2016. Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future, *Pesqui. Agropecuária Bras*, 51: 407-421.
- Godoy, C., L. J. Koga and M. G. Canteri. 2006. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. *Fitopatologia Brasileira*, 31: 63-68
- Goellner, K., M. loehrer, C. langenbach, U. Conrath, E. Koch and U. Schaffrath. 2010. *Phakopsora pachyrhizi*, the causal agent of Asian soybean rust. *Molecular Plant Pathology*, 11: 169-177.
- Harmon, C. L., P. F. Harmon, T. A. Mueller, J. J. Marois and G. L. Hartman. 2006. First report of *Phakopsora pachyrhizi* telia on kudzu in the United States. *Plant Disease*, 90:380
- Hartman, G. L., C. B. Hill, M. Twizeyimana, M. R. Miles, C. L. Harmon, P. F. Harmon, T.A. Mueller, J. J. Marois, G. L. Hartman and R. Bandyopadhyay. 2011. Interaction of soybean and *Phakopsora pachyrhizi*, the cause of soybean rust. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 6: 1-13.
- Hartman, G. L., T. C. Wang and A. T. Tschanz. 1991. Soybean rust development and the quantitative relationship between rust severity and soybean yield. *Plant Disease*, 75: 596-600.
- Ibiam, B., C. C. Ononuju, F. I. Onyenobi, A. D. Okorochoa and E. A. Ikwunagu. 2014. Evaluation of soybean (*Glycine max L. Merrill*) varieties for resistance to root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) under field conditions. *Asian Journal of Plant Science and Research* 4: 48-53.
- Igarashi, W. T., S. I. Mayra, M. O. Gustavo, J. G. A. S. Otavio and I. Seiji. 2012. Comparative morphology between uredospores of species of agricultural importance. *Brazilian Journal of Applied and Technology for Agricultural Science*, 5: 89-94.
- Kumudini, S., C. V. Godoy, J. E. Board, J. Omielan and M. Tolleraar. 2008. Mechanism involved in soybean rust induced yield reduction. *Crop science*, 48: 2334-2342.
- Levy, C. 2005. Epidemiology and chemical control of soybean rust in southern Africa. *Plant Disease*, 89: 669-674.
- Li, S., J. R. Smith, J. R. Ray and R. D. Frederick. 2012. Identification of a new soybean rust resistance gene in PI567102B. *Theoretical and Applied Genetics*, 125: 133-142.
- Lin, S. Y. 1966. Studies on the physiologies races of soybean rust fungus *Phakopsora pachyrhizi* Syd. *Journal of Taiwan Agricultural Research* 51: 24-28.
- Miles, M.R., R.D. Frédérick and G.L. Hartman. 2006. Evaluation of soybean germplasm for resistance to *Phakopsora pachyrhizi*. Online. *Plant Health Progress*, 1-29.
- Murithi, M. H., F. Beed, M. Soko, J. S. Haudenshield and G. L. Hartman. 2015. First report of *Phakopsora pachyrhizi* on soybean causing rust in Malawi. *Plant*

- Disease, 99: 420-432.
- Murithi, M. H., S. J. Haudenshield, F. Beed, G. Mahuki, J. Joosten and L.G. Hartman. 2017. Virulence diversity of *Phakopsora pachyrhizi* isolates from east Africa compared to a geographically diversity collection. *Plant Disease*, 101: 1194-1200.
- Ono, Y., P. Buritica and J. F. Hennen. 1992. Delimitation of *Phakopsora*, *Physopella* and *Cerotelium* and their species on Leguminosae. *Mycologia*, 96: 825-850.
- Pham, T. A., M. R. Miles, R. D. Frédérick, C. D. Hill and G. L. Hartman. 2009. Differential responses of resistant soybean entries to isolates of *Phakopsora pachyrhizi*. *Plant Disease*, 93: 224-228.
- Renard, F. and G. Foucart. 2008. Les maladies foliaires de la fin de végétation en culture de maïs. CIPFCentre pilote en culture de maïs. Laboratoire d'Ecophysiologie et d'Amélioration Végétale. UCL-Louvain-la-Neuve. 6
- Roxana, L. M., N.P. Rosanna, A. Alicia and I. Antonio. 2016. Germination and infection of *phakopsora pachyrhizi* under simulated environment of the central area of santa fe, argentina. *Chilean Journal of Agricultural Animal Sciences*, 32: 173-183.
- Sachin, K., V.B. Nargund and J. Shamarao. 2020. Morphological comparison of isolates of *Phakopsora pachyrhizi* from different locations of the Karnataka. *Pathobiology and Physiology*, 4: 1-2
- Saksirirat, W. and H.H. Hoppe 1991. Teliospore germination of soybean rust fungus (*Phakopsora pachyrhizi* Syd.). *Journal of Phytopathology*, 132: 339-342
- Santoir, C. and A. Bopda. 1995. Atlas régional Sud Cameroun. Office de la recherche scientifique Outre-Mer, Paris, France.
- Schiffers, B. and C. Moreira. 2011. Foundations of crop protection.
- Takamuhabwa, P. and M. Maphosa. 2012. States of knowledge in breeding for resistance to soybean rust in the developing world FAO plant production and protection paper, FAO Rome, Italy, 204.
- Twizeyimana, M. and G. L. Hartman. 2012. Pathogenic variation of *Phakopsora pachyrhizi* isolates on soybean in the United States from 2006 to 2009. *Plant Disease*, 96: 75-81.
- Twizeyimana, M. and G. L. Hartman. 2012. Pathogenic variation of *Phakopsora pachyrhizi* isolates on soybean in the United States from 2006 to 2009. *Plant Disease*, 95: 75-81.
- Twizeyimana, M. P., S. Ojiambo, K. Sonder, T. Ikotun, G. L. Hartman and R. Bandyopadhyay. 2009. Pathogenic variation of *Phakopsora pachyrhizi* infecting soybean in Nigeria. *Phytopathology*, 99: 353-361.
- Vittal, R., H. C. Yang and G.L. Hartman. 2012. Anastomosis of germ tubes and migration of nuclei in germ tube networks of the soybean rust pathogen, *Phakopsora pachyrhizi*. *European Journal of Plant Pathology*, 132: 163-167
- Yamanaka, N., Y. V Yamaoka, M. Kato, L. G. Lemos, A. L. L. Passianotto, J. V. M. Santos, E. R. Benitez, R. V. Abdelnoor, R. M. Soares and K. Suenaga. 2010. Development of classification criteria for resistance to soybean rust and differences in virulence among Japanese and Brazilian rust populations. *Tropical Plant Pathology*, 35: 153-162.
- Yamaoka, Y. N. Yamanaka, H. Akamatsu and K. Suenega. 2014. Pathogenic race of soybean rust *Phakopsora pachyrhizi* collected in Tsukuba and vicinity in Ibaraki, Japan. *Journal of General Plant Pathology*, 80: 184-188.
- Yamaoka, Y., Y. Fujiwars, M. Kakishima, K. Katsuya and K. Yamada. 2002. Pathogenic races of *Phakopsora pachyrhizi* on soybean and wild host plants collected in Japan. *Journal of General Plant Pathology*, 68: 52-56.

Contribution of Authors:

Fabrice C. G. Gbaporo	: Conduct the Lab experiments and writes the first draft of the manuscript
Angèle P. Ndogho	: Read and Review the manuscript
Sylvère L. L. Dida	: Conduct in lab, Read and Review the manuscript
Patrice Z. Ngatsi	: Analyses data and review the manuscript data and review de manuscript
Cédrik B. W. Chedjou	: Conduct manipulation in lab
Zachée Ambang	: Selected the scope of the work and reviews the manuscript