

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE EN SCIENCE DE LA VIE, SANTÉ
ET ENVIRONNEMENT



FACULTE DES SCIENCES

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL IN LIFE
SCIENCE, HEALTH &
ENVIRONMENTAL SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES

DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

Facteurs épidémiologiques et gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun

Thèse présentée et soutenue en vue de l'obtention du titre de Docteur/Ph.D. en
Biologie des Organismes Végétaux

Option : Biotechnologies Végétales

Par :

AKOUTOU MVONDO Etienne,

Master ès Sciences

Matricule: 08S0018

Sous la codirection de

NDO Eunice Golda Danièle
Maitre de Recherche
IRAD



AMBANG Zachée
Professeur

Année 2023

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE EN SCIENCE DE LA VIE, SANTÉ
ET ENVIRONNEMENT



FACULTE DES SCIENCES

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL IN LIFE
SCIENCE, HEALTH &
ENVIRONMENTAL SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES

DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

Facteurs épidémiologiques et gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun

Thèse présentée et soutenue en vue de l'obtention du titre de Docteur/Ph.D. en
Biologie des Organismes Végétaux

Option : Biotechnologies Végétales

Par :

AKOUTOU MVONDO Etienne,

Master ès Sciences

Matricule: 08S0018

Sous la codirection de

NDO Eunice Golda Danièle

Maitre de Recherche
IRAD

AMBANG Zachée

Professeur

Année 2023

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 31 MAI 2023

ADMINISTRATION

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

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

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 Sclolarité DAARS : AJEAGAH Gideon AGHAINDUM, *Professeur*

1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (43)

N°	NOMS ET PRÉNOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1.	BIGOGA DAIGA Jude	Professeur	En poste
2.	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
3.	KANSCI Germain	Professeur	En poste
4.	MBACHAM FON Wilfred	Professeur	En poste
5.	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	<i>Chef de Département</i>
6.	NGUEFACK Julienne	Professeur	En poste
7.	NJAYOU Frédéric Nico	Professeur	En poste
8.	OBEN Julius ENYONG	Professeur	En poste

1.	ACHU Merci BIH	Maître de Conférences	En poste
2.	ATOUGHO Barbara MMA	Maître de Conférences	En poste
3.	AZANTSA KINGUE GABIN BORIS	Maître de Conférences	En poste
4.	BELINGA née NDOYE FOE F. M. C.	Maître de Conférences	<i>Chef DAF / FS</i>
5.	DJUIDJE NGOUNOUE Marceline	Maître de Conférences	En poste

6.	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Maître de Conférences	En poste
7.	EFFA ONOMO Pierre	Maître de Conférences	<i>VD/FS/Univ Ebwa</i>
8.	EWANE Cécile Annie	Maître de Conférences	En poste
9.	KOTUE TAPTUE Charles	Maître de Conférences	En poste
10.	LUNGA Paul KEILAH	Maître de Conférences	En poste
11.	MBONG ANGIE M. Mary Anne	Maître de Conférences	En poste
12.	MOFOR née TEUGWA Clotilde	Maître de Conférences	<i>Doyen FS / UDs</i>
13.	NANA Louise épouse WAKAM	Maître de Conférences	En poste
14.	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
15.	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Maître de Conférences	En poste

16.	AKINDEH MBUH NJI	Chargé de Cours	En poste
17.	BEBEE Fadimatou	Chargée de Cours	En poste
18.	BEBOY EDJENGUELE Sara Nathalie	Chargé de Cours	En poste
19.	DAKOLE DABOY Charles	Chargé de Cours	En poste
20.	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Chargé de Cours	En poste
21.	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
22.	FOUPOUAPOUOGNIGNI Yacouba	Chargé de Cours	En poste
23.	KOUOH ELOMBO Ferdinand	Chargé de Cours	En poste
24.	MANANGA Marlyse Joséphine	Chargée de Cours	En poste
25.	OWONA AYISSI Vincent Brice	Chargé de Cours	En poste
26.	Palmer MASUMBE NETONGO	Chargé de Cours	En poste
27.	PECHANGOU NSANGOU Sylvain	Chargé de Cours	En poste
28.	WILFRED ANGIE ABIA	Chargé de Cours	En poste

29.	BAKWO BASSOGOG Christian Bernard	Assistant	En Poste
30.	ELLA Fils Armand	Assistant	En Poste
31.	EYENGA Eliane Flore	Assistant	En Poste
32.	MADIESSE KEMGNE Eugenie Aimée	Assistant	En Poste
33.	MANJIA NJIKAM Jacqueline	Assistant	En Poste
34.	MBOUCHE FANMOE Marceline Joëlle	Assistant	En poste
35.	WOGUIA Alice Louise	Assistant	En Poste

2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (52)
--

1.	AJEAGAH Gideon AGHAINDUM	Professeur	<i>DAARS/FS</i>
2.	BILONG BILONG Charles-Félix	Professeur	<i>Chef de Département</i>
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	<i>CD et Vice Doyen/FMSB/Uyl</i>
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	<i>Inspecteur de service / Coord.Progr./MINSANTE</i>
14.	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Professeur	En poste

15.	ALENE Désirée Chantal	Maître de Conférences	<i>Vice Doyen/ Uté Ebwa</i>
16.	BILANDA Danielle Claude	Maître de Conférences	En poste
17.	DJIOGUE Séfirin	Maître de Conférences	En poste
18.	GOUNOUE KAMKUMO Raceline épse FOTSING	Maître de Conférences	En poste
19.	JATSA BOUKENG Hermine épse MEGAPTCHE	Maître de Conférences	En Poste
20.	LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.	Maître de Conférences	En poste
21.	MAHOB Raymond Joseph	Maître de Conférences	En poste
22.	MBENOUN MASSE Paul Serge	Maître de Conférences	En poste
23.	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
24.	MOUNGANG Luciane Marlyse	Maître de Conférences	En poste
25.	NOAH EWOTI Olive Vivien	Maître de Conférences	En poste
26.	MONY Ruth épse NTONE	Maître de Conférences	En Poste
27.	NGUEGUIM TSOFAK Florence	Maître de Conférences	En poste
28.	NGUEMBOCK	Maître de Conférences	En poste
29.	TAMSA ARFAO Antoine	Maître de Conférences	En poste
30.	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste

31.	ATSAMO Albert Donatien	Chargé de Cours	En poste
32.	BASSOCK BAYIHA Etienne Didier	Chargé de Cours	En poste
33.	ETEME ENAMA Serge	Chargé de Cours	En poste
34.	FEUGANG YOUNSSI François	Chargé de Cours	En poste
35.	FOKAM Alvine Christelle Epse KENGNE	Chargé de Cours	En poste
36.	GONWOUO NONO Legrand	Chargé de Cours	En poste
37.	KANDEDA KAVAYE Antoine	Chargé de Cours	En poste
38.	KOGA MANG DOBARA	Chargé de Cours	En poste
39.	LEME BANOCK Lucie	Chargé de Cours	En poste
40.	MAPON NSANGOU Indou	Chargé de Cours	En poste
41.	METCHI DONFACK MIREILLE FLAURE EPSE GHOU MO	Chargé de Cours	En poste
42.	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Chargé de Cours	En poste
43.	NGOULATEU KENFACK Omer Bébé	Chargé de Cours	En poste

44.	NJUA Clarisse YAFI	Chargée de Cours	<i>Chef Div. Uté Bamenda</i>
45.	NWANE Philippe Bienvenu	Chargé de Cours	En poste
46.	TADU Zephyrin	Chargé de Cours	En poste
47.	YEDE	Chargé de Cours	En poste
48.	YOUNOUSSA LAME	Chargé de Cours	En poste

49.	AMBADA NDZENGUE GEORGIA ELNA	Assistante	En poste
50.	KODJOM WANCHE Jacguy Joyce	Assistante	En poste
51.	NDENGUE Jean De Matha	Assistant	En poste
52.	ZEMO GAMO Franklin	Assistant	En poste

3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (34)

1.	AMBANG Zachée	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2.	DJOCGOUE Pierre François	Professeur	En poste
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.	MAHBOU SOMO TOUKAM. Gabriel	Maître de Conférences	En poste
10.	MALA Armand William	Maître de Conférences	En poste
11.	MBARGA BINDZI Marie Alain	Maître de Conférences	<i>DAAC /UDla</i>
12.	NDONGO BEKOLO	Maître de Conférences	En poste
13.	NGALLE Hermine BILLE	Maître de Conférences	En poste
14.	NGODO MELINGUI Jean Baptiste	Maître de Conférences	En poste
15.	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.	Maître de Conférences	<i>CT / MINRESI</i>
16.	TONFACK Libert Brice	Maître de Conférences	En poste
17.	TSOATA Esaïe	Maître de Conférences	En poste
18.	ONANA JEAN MICHEL	Maître de Conférences	En poste

19.	DJEUANI Astride Carole	Chargé de Cours	En poste
20.	GONMADGE CHRISTELLE	Chargée de Cours	En poste
21.	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Chargé de Cours	En poste
22.	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Chargé de Cours	En poste
23.	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Chargé de Cours	En poste
24.	NSOM ZAMBO EPSE PIAL ANNIE CLAUDE	Chargé de Cours	<i>En détachement/UNESCO MALI</i>

25.	GODSWILL NTSOMBOH NTSEFONG	Chargé de Cours	En poste
26.	KABELONG BANAHO Louis-Paul- Roger	Chargé de Cours	En poste
27.	KONO Léon Dieudonné	Chargé de Cours	En poste
28.	LIBALAH Moses BAKONCK	Chargé de Cours	En poste
29.	LIKENG-LI-NGUE Benoit C	Chargé de Cours	En poste
30.	TAEDOUNG Evariste Hermann	Chargé de Cours	En poste
31.	TEMEGNE NONO Carine	Chargé de Cours	En poste
32.	MANGA NDJAGA JUDE	Assistant	En poste
33.	DIDA LONTSI Sylvere Landry	Assistant	En poste
34.	METSEBING Blondo-Pascal	Assistant	En poste

4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (28)

1.	GHOGOMU Paul MINGO	Professeur	<i>Ministre Chargé de Mission PR</i>
2.	NANSEU NJIKI Charles Péguy	Professeur	En poste
3.	NDIFON Peter TEKE	Professeur	<i>CT MINRESI</i>
4.	NENWA Justin	Professeur	En poste
5.	NGAMENI Emmanuel	Professeur	<i>Doyen FS Univ.Ngaoundere</i>
6.	NGOMO Horace MANGA	Professeur	<i>Vice Chancellor/UB</i>
7.	NJOYA Dayirou	Professeur	En poste

8.	ACAYANKA Elie	Maître de Conférences	En poste
9.	EMADAK Alphonse	Maître de Conférences	En poste
10.	KAMGANG YOUBI Georges	Maître de Conférences	En poste
11.	KEMMEGNE MBOUGUEM Jean C.	Maître de Conférences	En poste
12.	KENNE DEDZO GUSTAVE	Maître de Conférences	En poste
13.	MBEY Jean Aime	Maître de Conférences	En poste
14.	NDI NSAMI Julius	Maître de Conférences	<i>Chef de Département</i>
15.	NEBAH Née NDOSIRI Bridget NDOYE	Maître de Conférences	<i>Sénatrice/SENAT</i>
16.	NJIOMOU C. épouse DJANGANG	Maître de Conférences	En poste
17.	NYAMEN Linda Dyorisse	Maître de Conférences	En poste
18.	PABOUDAM GBAMBIE AWAWOU	Maître de Conférences	En poste
19.	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Maître de Conférences	En poste
20.	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Maître de Conférences	<i>Chef Service/ ENS Bertoua</i>
21.	CHEUMANI YONA Arnaud M.	Maître de Conférences	En poste
22.	KOUOTOU DAOUDA	Maître de Conférences	En poste

23.	MAKON Thomas Beauregard	Chargé de Cours	En poste
24.	NCHIMI NONO KATIA	Chargée de Cours	En poste
25.	NJANKWA NJABONG N. Eric	Chargé de Cours	En poste
26.	PATOUOSSA ISSOFA	Chargé de Cours	En poste
27.	SIEWE Jean Mermoz	Chargé de Cours	En Poste
28.	BOYOM TATCHEMO Franck W.	Assistant	En Poste

5- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (37)

1.	Alex de Théodore ATCHADE	Professeur	<i>Vice-Doyen / DPSAA</i>
2.	DONGO Etienne	Professeur	<i>Vice-Doyen/FSE/UIYI</i>
3.	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	<i>Chef de Département UDS</i>
4.	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	<i>Directeur/ MINESUP/ Chef de Département</i>
5.	WANDJI Jean	Professeur	En poste
6.	MBAZOA née DJAMA Céline	Professeur	En poste

7.	AMBASSA Pantaléon	Maître de Conférences	En poste
8.	EYONG Kenneth OBEN	Maître de Conférences	En poste
9.	FOTSO WABO Ghislain	Maître de Conférences	En poste
10.	KAMTO Eutrophe Le Doux	Maître de Conférences	En poste
11.	KENMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
12.	KEUMEDJIO Félix	Maître de Conférences	En poste
13.	KOUAM Jacques	Maître de Conférences	En poste
14.	MKOUNGA Pierre	Maître de Conférences	En poste
15.	MVOT AKAK CARINE	Maître de Conférences	En poste
16.	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	<i>Chef de Cellule MINRESI</i>
17.	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Maître de Conférences	<i>C.E.A/ MINESUP</i>
18.	NOTE LOUGBOT Olivier Placide	Maître de Conférences	<i>DAAC/Uté Bertoua</i>
19.	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
20.	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
21.	TAGATSING FOTSING Maurice	Maître de Conférences	En poste
22.	TCHOUANKEU Jean-Claude	Maître de Conférences	<i>Doyen /FS/ UYI</i>
23.	YANKEP Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
24.	ZONDEGOUMBA Ernestine	Maître de Conférences	En poste

25.	MESSI Angélique Nicolas	Chargé de Cours	En poste
26.	NGNINTEDO Dominique	Chargé de Cours	En poste
27.	NGOMO Orléans	Chargée de Cours	En poste
28.	NONO NONO Éric Carly	Chargé de Cours	En poste
29.	OUAHOUE WACHE Blandine M.	Chargée de Cours	En poste
30.	OUETE NANTCHOUANG Judith Laure	Chargée de Cours	En poste

31.	SIELINOU TEDJON Valérie	Chargé de Cours	En poste
32.	TCHAMGOUE Joseph	Chargé de Cours	En poste
33.	TSAFFACK Maurice	Chargé de Cours	En poste
34.	TSAMO TONTSA Armelle	Chargé de Cours	En poste
35.	TSEMEUGNE Joseph	Chargé de Cours	En poste

36.	MUNVERA MFIFEN Aristide	Assistant	En poste
37.	NDOGO ETEME Olivier	Assistant	En poste

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

1.	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	<i>Chef de Division MINESUP</i>
2.	FOUDA NDJODO Marcel Laurent	Professeur	<i>Inspecteur Général/ MINESUP</i>

3.	NDOUNDAM René	Maître de Conférences	En poste
4.	TSOPZE Norbert	Maître de Conférences	En poste

5.	ABESSOLO ALO'O Gislain	Chargé de Cours	<i>Chef de Cellule MINFOPRA</i>
6.	AMINOU HALIDOU	Chargé de Cours	<i>Chef de Département</i>
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.	MESSI NGUELE Thomas	Chargé de Cours	En poste
15.	MONTHE DJIADEU Valery M.	Chargé de Cours	En poste
16.	NZEKON NZEKO'O Armel Jacques	Chargé de Cours	En poste
17.	OLLE OLLE D.C.G. Delort	Chargé de Cours	<i>Sous-Directeur ENSET Ebolowa</i>
18.	TAPAMO Hyppolite	Chargé de Cours	En poste

19.	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste
20.	EKODECK Stéphane Gaël Raymond	Assistant	En poste
21.	MAKEMBE. S. Oswald	Assistant	<i>Directeur CUTI</i>
22.	NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.	Assistant	En poste

7- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (33)

1.	AYISSI Raoult Domingo	Professeur	<i>Chef de Département</i>
----	-----------------------	------------	----------------------------

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	<i>Chef Service des Programmes & Diplômes/FS/UYI</i>
7.	TAKAM SOH Patrice	Maître de Conférences	En poste
8.	TCHAPNDA NJABO Sophonie B.	Maître de Conférences	<i>Directeur/AIMS Rwanda</i>
9.	TCHOUNDJA Edgar Landry	Maître de Conférences	En poste

10	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	<i>Chef Cellule MINEPAT</i>
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	LOUMNGAM KAMGA Victor	Chargé de Cours	En poste
17	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
18	MBATAKOU Salomon Joseph	Chargé de Cours	En poste
19	MENGUE MENGUE David Joël	Chargé de Cours	<i>Chef Dpt /ENS Université d'Ebolowa</i>
20	MBIAKOP Hilaire George	Chargé de Cours	En poste
21	NGUEFACK Bernard	Chargé de Cours	En poste
22	NIMPA PEFOUKEU Romain	Chargée de Cours	En poste
23	OGADOA AMASSAYOGA	Chargée de Cours	En poste
24	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	<i>En stage</i>
25	TCHEUTIA Daniel Duviol	Chargé de Cours	En poste
26	TETSADJIO TCHILEPECK M. Eric.	Chargé de Cours	En poste

27	BITYE MVONDO Esther Claudine	Assistante	En poste
28	FOKAM Jean Marcel	Assistant	En poste
29	GUIDZAVAI KOUCHERE Albert	Assistant	En poste

30	MANN MANYOMBE Martin Luther	Assistant	En poste
31	MEFENZA NOUNTU Thiery	Assistant	En poste
32	NYOUMBI DLEUNA Christelle	Assistant	En poste
33	TENKEU JEUFACK Yannick Léa	Assistant	En poste

8- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (24)

1.	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2.	NYEGUE Maximilienne Ascension	Professeur	<i>VICE-DOYEN / DSSE</i>

3.	ASSAM ASSAM Jean Paul	Maître de Conférences	En poste
4.	BOUGNOM Blaise Pascal	Maître de Conférences	En poste
5.	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste
6.	KOUITCHEU MABEKU Epse KOUAM Laure Brigitte	Maître de Conférences	En poste
7.	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
8.	NJIKI BIKOÏ Jacky	Maître de Conférences	En poste
9.	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Maître de Conférences	En poste

10.	ESSONO Damien Marie	Chargé de Cours	En poste
11.	LAMYE Glory MOH	Chargé de Cours	En poste
12.	MEYIN A EBONG Solange	Chargé de Cours	En poste
13.	MONI NDEDI Esther Del Florence	Chargé de Cours	En poste
14.	NKOUDOU ZE Nardis	Chargé de Cours	En poste
15.	TAMATCHO KWEYANG Blandine Pulchérie	Chargé de Cours	En poste
16.	TCHIKOUA Roger	Chargé de Cours	<i>Chef de Service de la Scolarité</i>
17.	TOBOLBAÏ Richard	Chargé de Cours	En poste

18.	NKOUÉ TONG Abraham	Assistant	En poste
19.	SAKE NGANE Carole Stéphanie	Assistant	En poste
20.	EZO'O MENGO Fabrice Téléfor	Assistant	En poste
21.	EHETH Jean Samuel	Assistant	En poste
22.	MAYI Marie Paule Audrey	Assistant	En poste
23.	NGOUE NAM Romial Joël	Assistant	En poste
24.	NJAPNDOUNKE Bilkissou	Assistant	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 H. Paul	Professeur	<i>Vice-Recteur. Uté Ngaoundéré</i>
4.	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
5.	HONA Jacques	Professeur	En poste
6.	NANA ENGO Serge Guy	Professeur	En poste
7.	NANA NBENDJO Blaise	Professeur	En poste
8.	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	<i>Chef de Département</i>
9.	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Professeur	En poste
10.	NOUAYOU Robert	Professeur	En poste
11.	SAIDOU	Professeur	<i>Chef de centre/IRGM/MINRESI</i>
12.	TABOD Charles TABOD	Professeur	<i>Doyen FSUniv/Bda</i>
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	<i>DG/HYDRO Mekin</i>
17.	BODO Bertrand	Maître de Conférences	En poste
18.	ENYEGUE A NYAM épse 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.	MBINACK Clément	Maître de Conférences	En poste
22.	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Maître de Conférences	En poste
23.	MELI'I Joelle Larissa	Maître de Conférences	En poste
24.	MVOGO ALAIN	Maître de Conférences	En poste
25.	NDOP Joseph	Maître de Conférences	En poste
26.	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
27.	SIMO Elie	Maître de Conférences	En poste
28.	VONDOU Derbetini Appolinaire	Maître de Conférences	En poste
29.	WAKATA née BEYA Annie Sylvie	Maître de Conférences	<i>Directeur/ENS/Uyi</i>
30.	WOULACHE Rosalie Laure	Maître de Conférence	<i>En stage depuis février 2023</i>
31.	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En poste
32.	AYISSI EYEBE Guy François Valérie	Chargé de Cours	En poste

33.	CHAMANI Roméo	Chargé de Cours	En poste
34.	DJIOTANG T. L. Angennes	Chargée de Cours	En poste
35.	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste
36.	FOUEJIO David	Chargé de Cours	<i>Chef Cell. MINADER</i>
37.	KAMENI NEMATCHOUA M.	Chargé de Cours	En poste
38.	LAMARA Maurice	Chargé de Cours	En poste
39.	OTTOU ABE Martin Thierry	Chargé de Cours	Directeur Unité de production des réactifs/IMPM
40.	TEYOU NGOUPO Ariel	Chargé de Cours	En poste
41.	WANDJI NYAMSI William	Chargé de Cours	En poste
42.	NGA ONGODO Dieudonné	Assistant	En poste
43.	SOUFFO TAGUEU Merimé	Assistant	En poste

10- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (42)

1.	BITOM Dieudonné-Lucien	Professeur	<i>Doyen / FASA /UDs</i>
2.	NDAM NGOUPAYOU Jules-Remy	Professeur	En poste
3.	NDJIGUI Paul-Désiré	Professeur	<i>Chef de Département</i>
4.	NGOS III Simon	Professeur	En poste
5.	NKOUMBOU Charles	Professeur	En poste
6.	NZENTI Jean-Paul	Professeur	En poste
7.	ONANA Vincent Laurent	Professeur	<i>Chef de Département/Uté. Eb.</i>
8.	YENE ATANGANA Joseph Q.	Professeur	<i>Chef Div. /MINTP</i>

9.	ABOSSOLO née ANGUE Monique	Maître de Conférences	<i>Vice-Doyen / DRC</i>
10.	BISSO Dieudonné	Maître de Conférences	En poste
11.	EKOMANE Emile	Maître de Conférences	<i>Chef Div./Uté Ebolowa</i>
12.	Elisé SABABA	Maitre de Conférences	En poste
13.	FUH Calistus Gentry	Maître de Conférences	<i>Sec. d'Etat/MINMIDT</i>
14.	GANNO Sylvestre	Maître de Conférences	En poste
15.	GHOGOMU Richard TANWI	Maître de Conférences	<i>Chef de Div. /Uté Bertoua</i>
16.	MBIDA YEM	Maitre de Conférences	En poste
17.	MOUNDI Amidou	Maître de Conférences	<i>CT/MINIMDT</i>
18.	NGO BIDJECK Louise Marie	Maître de Conférences	En poste
19.	NGUEUTCHOUA Gabriel	Maître de Conférences	<i>CEA/MINRESI</i>
20.	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
21.	NYECK Bruno	Maître de Conférences	En poste

22.	TCHAKOUNTE Jacqueline épouse NUMBEM	Maître de Conférences	<i>Chef. Cell /MINRESI</i>
23.	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
24.	TEMGA Jean Pierre	Maître de Conférences	En poste
25.	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	<i>DG/ART</i>

26.	ANABA ONANA Achille Basile	Chargé de Cours	En poste
27.	BEKOA Etienne	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, épouse BITOM	Chargée de Cours	En poste
31.	MBESSE Cécile Olive	Chargée de Cours	En poste
32.	METANG Victor	Chargé de Cours	En poste
33.	MINYEM Dieudonné	Chargé de Cours	<i>Chef Serv./Uté Maroua</i>
34.	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargée de Cours	En poste
35.	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
36.	NTSAMA ATANGANA Jacqueline	Chargée de Cours	En poste
37.	TCHAPTCHET TCHATO De P.	Chargé de Cours	En poste
38.	TEHNA Nathanaël	Chargé de Cours	En poste
39.	FEUMBA Roger	Chargé de Cours	En poste
40.	MBANGA NYOBE Jules	Chargé de Cours	En poste

41.	KOAH NA LEBOGO Serge Parfait	Assistant	En poste
42.	NGO'O ZE ARNAUD	Assistant	En poste
43.	TENE DJOUKAM Joëlle Flore, épouse KOUANKAP NONO	Assistante	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 (01)	15 (11)	13 (03)	7 (05)	43 (20)
BPA	14 (01)	16 (09)	18 (04)	4 (02)	52 (16)
BPV	6 (01)	12 (02)	13 (07)	3 (00)	34 (10)
CI	7 (01)	15 (04)	5 (01)	1 (00)	28 (06)
CO	6 (01)	18 (04)	11 (04)	2 (00)	37 (09)
IN	2 (00)	2 (00)	14 (01)	4 (00)	22 (01)
MAT	1 (00)	8 (00)	17 (01)	7 (02)	33 (03)
MIB	2 (01)	7 (03)	8 (04)	7 (02)	24 (10)
PHY	15 (01)	15 (04)	11 (01)	2 (00)	43 (06)
ST	8 (00)	17 (03)	15 (04)	3 (01)	43 (08)
Total	69 (07)	125 (40)	125 (30)	40 (12)	359 (89)

Soit un total de	359 (89) dont :
- Professeurs	69 (07)
- Maîtres de Conférences	125 (40)
- Chargés de Cours	125 (30)
- Assistants	40 (12)
() = Nombre de Femmes	89

DEDICACE

A

ESSIANE MVONDO Hélène,

EKOTTO ONDOUA Mariette,

MANDIANG A BEP Geraldine,

EKOTTO AKOUTOU Abigaille

Et

AKOUTOU MVONDO Baruck Ethan.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail n'aurait été possible sans le concours et l'appui d'un certain nombre d'instituts et de personnes. Je tiens à remercier :

- Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) à travers son Directeur Général, *International Foundation for Science* (IFS) à travers la bourse de recherche N° I-1-C-6218-1 accordée en 2018 et le DP-Agroforesterie Cameroun, à travers le soutien accordé aux doctorants durant les années 2018, 2019 et 2020 ; qui ont financé les activités de ce travail ;
- Pr. AMBANG Zachée, Chef du Département de Biologie et Physiologie Végétales (BPV) de l'Université de Yaoundé 1, Coordonnateur de l'Unité de Recherche de Phytopathologie et de la Protection des Plantes, Laboratoire de Phytopathologie du BPV, qui, malgré ses multiples occupations a accepté de co-diriger cette thèse ;
- Dr. NDO Eunice Golda Danièle épouse MFOU'OU MFOU'OU, Maître de Recherche à l'IRAD, Chef du Centre Régional de Recherche Agricole de Mbalmayo, co-animatrice du DP Agroforesterie Cameroun, qui a co-dirigé cette thèse ;
- Dr. Noé WOIN, Directeur de Recherche, Directeur Général de l'IRAD. Merci pour le soutien multiforme accordé aux chercheurs de l'IRAD et tout particulièrement aux chercheurs nouvellement recrutés ;
- Dr. BIDZANGA NOMO Lucien, Maître de Recherche à l'IRAD, pour tous les efforts consentis et le partage d'expérience, lesquels ont largement amélioré la qualité de ce travail ;
- Dr. CILAS Christian, Directeur de Recherche, Habilité à Diriger la Recherche, CIRAD, Directeur Régional pour l'Afrique de l'Ouest côtière, basé à Abidjan ; pour sa contribution active à la formulation et la conception de ce projet ;
- Dr. Jean-Michel ARMAND, Directeur Régionale de l'ICRAF, Co-animateur du DP Agroforesterie Cameroun pour son apport et les opportunités qu'il m'a accordées au travers du DP Agroforesterie ;
- Pr. NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L., pour sa force, ses impulsions et ses conseils avisés qui m'ont ouvert la porte vers de considérables opportunités ;

- Dr. BELLA MANGA, Dr. NYASSE Salomon, Dr EHABE et Dr. CILAS Christian ;
veuillez trouver ici toute ma reconnaissance pour votre inestimable contribution dans la réalisation de ce travail ;
- Les membres du jury qui ont pris de leur précieux temps pour évaluer ce travail et apporter de considérables corrections et remarques, lesquels ont améliorées la qualité de cette thèse ;
- Dr. MANGA ESSOUMA François, Dr. NGATI Patrice, Dr. DIDA LONTSI Sylvère Landry et tous ceux qui ont contribué à l'amélioration de ce document par leur fine lecture ;
- M. BAMAGUENA Prosper, BOUENTCHELE Luc à Boyambassa, BIYAGA à Kédia. Ce travail n'aurait probablement pas abouti sans l'aide et la bonne volonté de tous les producteurs qui ont mis leurs parcelles à notre disposition pour la réalisation de nos travaux ;
- tous mes collègues de l'IRAD et particulièrement à messieurs et dames ZING ZING Bertrand, Romuald NSOUGA, LOMBEKO OBE Vicky ;
- ATANGANA Etienne Cédric, MOYIO Rose, MBASSA Miguel qui ont activement contribué à la réalisation de ce travail dans le cadre de leurs activités de Master ;
- mes frères MVONDO AKOUTOU Léopold, AKOUTOU AKOUTOU Francis, AKOUTOU Cyrille, MVONDO AKOUTOU Frédéric Prinzy ; et mes sœurs ESIANE Hélène Rita, AKOUTOU Caroline Annonciade, AKOUTOU Salomé Claréta et AKOUTOU Damaris Lafortune ;
- tous mes neveux et nièces et tout particulièrement à AKOUTOU MVONDO L. Donald ;

Que Toute la grande famille MVONDO AKOUTOU Frédéric trouve ici ma reconnaissance pour son soutien.

SOMMAIRE

DEDICACE	xv
REMERCIEMENTS	xvi
SOMMAIRE.....	xviii
LISTE DES FIGURES	xx
LISTE DES TABLEAUX	xxii
LISTE DES ABREVIATIONS	xxiii
RESUME	xxiv
ABSTRACT	xxvi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTÉRATURE	6
I.1. Agrumes	6
I.1.1. Généralités sur les agrumes	6
I.1.2. Etat de l'agrumiculture au Cameroun	9
I.2. Gommose des agrumes.....	12
I.2.1. Classification et taxonomie du genre <i>Phytophthora</i>	12
I.2.2. Diversité spécifique du genre <i>Phytophthora</i>	13
I.2.3. Historique et distribution géographique de la gommose des agrumes.....	14
I.2.4. Importance économique des <i>Phytophthora</i>	15
I.2.5. Symptômes de la gommose des agrumes	15
I.2.6. Cycle épidémiologique de la gommose : cas de <i>Phytophthora parasitica</i>	16
I.2.7. Moyen de dispersion de l'inoculum et condition d'infection des <i>Phytophthora</i> .	18
I.2.8. Méthodes de gestion de la gommose des agrumes.....	19
I.2.9. Nécessité des procédés agroécologiques dans la gestion des bioagresseurs	23
I.3. Interactions bioagresseurs et structure des populations hôtes dans les systèmes agroforestiers tropicaux.....	24
I.3.1. Composition spécifique et structure des SAFC.....	24
I.3.2. Interactions plantes hôtes-bioagresseurs dans les agroforêts complexes	25
I.3.3. Mécanismes biophysiques liés à la régulation des bioagresseurs dans les systèmes agroforestiers.....	25
I.3.4. Effet de l'ombrage sur les agents pathogènes	27
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES	28
II.1. Matériel	28
II.1.1. Zone et sites d'étude	28
II.1.2. Matériel utilisé	29
II.2. Méthodes.....	30

II.2.1. Description de la situation épidémiologique de la gommose à <i>Phytophthora</i> sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun	30
II.2.2. Evaluation de l'effet des caractéristiques structurales des SAFC sur IG.....	35
II.2.3. Détermination facteurs de risque épidémiologique de la gommose	40
II.2.4. Evaluation <i>in vitro</i> du potentiel de deux agents de lutte biologique contre les <i>Phytophthora</i> identifiés.....	41
II.2.5. Traitement et analyse des données.....	46
CHAPITRE III. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	53
III.1. Résultats.....	53
III.1.1. Intensité de la gommose et espèces de <i>Phytophthora</i> responsables de la maladie dans les zones de forêts humides du Cameroun.....	53
III.1.2. Effet des caractéristiques structurales du SAFC sur IG.....	60
III.1.3. Effet des facteurs environnementaux et agronomiques sur IG.....	77
III.1.4. Activité antifongique <i>in vitro</i> de deux agents de lutte biologique sur les <i>Phytophthora</i> inféodés aux agrumes.....	84
III.2. Discussion.....	90
III.2.1. Intensité de la gommose et espèces de <i>Phytophthora</i> responsables de la maladie dans les zones de forêts humides du Cameroun.....	90
III.2.2. Effet des caractéristiques structurales du SAFC sur IG.....	92
III.2.3. Effet des facteurs pédoclimatiques et agronomiques sur IG	99
III.2.4. Activité antifongique <i>in vitro</i> de deux agents de lutte biologique sur les <i>Phytophthora</i> inféodés aux agrumes.....	105
III.2.5. Synthèse des résultats	107
CHAPITRE IV. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	110
IV.1. Conclusion et recommandations	110
IV.2. Perspectives	111
BIBLIOGRAPHIE.....	113
Annexes	131

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Production globale des agrumes.....	8
Fig. 2. Production mondiale des agrumes en tonnes	8
Fig. 3. Production des agrumes au Cameroun entre 1961 et 2020.	10
Fig. 4. Croissance temporelle du nombre d'espèces de <i>Phytophthora</i> formellement décrites.....	14
Fig. 5. Symptômes de la gommose sur les agrumes	16
Fig. 6. Cycle épidémiologique de <i>Phytophthora parasitica</i> sur agrumes.	17
Fig. 7. Structure verticale d'un système agroforestier à base de cacaoyer	25
Fig. 8. Localisation des sites d'étude.....	29
Fig. 9. Illustration schématique de la quantification de l'étendue des chancre sur le collet des agrumes	32
Fig. 10. Méthodologie de piégeage des <i>Phytophthora</i> à partir des échantillons de sol.....	33
Fig. 11. Méthodologie de cartographie d'une parcelle élémentaire au sein d'un SAFC à l'aide d'une Station totale.	36
Fig. 12. Cartographie d'un SAFC.....	37
Fig. 13. Illustration des données prises lors de la caractérisation d'un arbre.	38
Fig. 14. Étapes de la synthèse des nanoparticules d'argent à partir des feuilles de <i>Tithonia diversifolia</i>	45
Fig. 14. Illustration des types de structures spatiales au sein des peuplements végétaux.	47
Figure 15. Schéma méthodologique utilisée pour l'exécution de la PLS entre les données d'intensité de gommose sur trois espèces d'agrumes en relation avec les variables pédoclimatiques et agronomiques.	52
Fig. 16. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de <i>Phytophthora citrophthora</i>	55
Fig. 17. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de <i>Phytophthora nicotianae</i>	56
Fig. 18. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de <i>Phytophthora palmivora</i>	57
Fig. 19. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de <i>Phytophthora cinnamomi</i>	58
Fig. 20. Croissance mycélienne des isolats de <i>Phytophthora</i> à 24°C et 35°C sur PDA et V8.....	59
Fig. 21. Estimation de la biodiversité et de la surface terrière.	61
Fig. 22. Variation du taux d'ombrage dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers	63
Fig. 23. Variation du taux d'ombrage dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers	65
Fig. 24. Relation entre le taux d'ombrage et intensité de la gommose des agrumes.....	66
Fig. 25. Regroupement des parcelles d'étude selon leur structure spatiale agrégée, aléatoire et régulière.....	67
Fig. 26. Cartographie d'un système agroforestier à base cacaoyers ayant une structure spatiale régulière des agrumes.....	68
Fig. 27. Fonction L(r) représentant une distribution régulière des agrumes dans un SAFC	68
Fig. 28. Cartographie d'un SAFC avec une structure spatiale aléatoire des agrumes.....	69
Fig. 29. Fonction $L(r)$ représentant une distribution aléatoire des agrumes dans un SAFC.....	69
Fig. 30. Cartographie d'un SAFC avec une structure spatiale agrégée des agrumes.	70
Fig. 31. Fonction L(r) représentant une distribution agrégée des agrumes dans un SAFC.....	70
Fig. 32. Relation entre les facteurs exogènes et le type de structure spatiale des agrumes dans les SAFC.....	75
Fig. 33. Principaux facteurs déterminant l'adoption de la structure spatiale des agrumes dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers	76

Figure 34. Sélection graphique des variables explicatives à l'aide d'une carte thermique de corrélation	80
Figure 35. Représentation en réseau par la régression par les moindres carrés partiels de IG en relation avec les espèces d'agrumes sur les variables prédictives.	81
Figure 36. Sélection graphique à l'aide d'une carte thermique de corrélation	82
Figure 37. Représentation en réseau par la régression par moindres carrés partiels de IG en relation avec les agents pathogènes sur les variables prédictives, montrant les corrélations positives (rouge) et négatives (vert) avec les critères de la dynamique.	83
Fig. 38. Effet antagoniste des souches <i>Trichoderma asperellum</i> PR11 sur les <i>Phytophthora</i> spp. inféodées aux agrumes	84
Fig. 39. Effet inhibiteur de <i>Trichoderma asperellum</i> contre <i>Phytophthora</i> spp.	85
Fig. 40. Interaction entre hyphes de <i>Phytophthora citrophthora</i> et mycoparasitisme des souches de <i>Trichoderma asperellum</i>	87
Fig. 41. Nanoparticules de nitrate d'argent formées à partir d'extrait aqueux de <i>Tithonia diversifolia</i> et les courbes d'absorption correspondantes	87
Fig. 42. Inhibition de la croissance de <i>Phytophthora</i> spp. par les nanoparticules de nitrate d'argent à base d'extrait aqueux de <i>T. diversifolia</i>	88
Figure 43. Inhibition de la croissance de <i>Phytophthora</i> spp. par les nanoparticules de nitrate d'argent à base d'extrait aqueux de <i>T. diversifolia</i>	89
Fig. 44. Efficacité in vitro des AgNPs sur les espèces de <i>Phytophthora</i> responsables de la gommose sur les agrumes	90
Figure 45. Modèle de gestion intégrée de la gommose à <i>Phytophthora</i> sur les agrumes	109

LISTE DES TABLEAUX

Tab. I. Classification taxonomique des <i>Phytophthora</i> au sein des <i>Oomycota</i>	13
Tab. II. Dispositif expérimental de base.	31
Tab. III. Répartition des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers étudiés	35
Tab. IV. Dispositif expérimental des confrontations directes.	42
Tab. V. Récapitulatif des variables retenues pour l'analyse PLS.	50
Tab. VI. Intensité de la gommose sur le collet des agrumes	54
Tab. VII. Distribution géographique des <i>Phytophthora</i> spp. inféodés aux agrumes dans la zone forestière humide du Cameroun	60
Tab. VIII. Fréquences relatives des sous-populations d'arbres constituant les SAFC dans les zones de forêts humides du Cameroun.	61
Tab. IX. Top 10 des arbres associés les plus fréquentes dans les SAFC.....	62
Tab. X. Taux d'ombrage moyen dans les sites d'étude et pourcentage d'agrumes placés dans différentes conditions d'ombrage	64
Tab. XI. Effet du taux d'ombrage sur IG des agrumes.	65
Tab. XII. Valeurs de L(r) caractérisant les différents types de structure spatiale des agrumes	71
Tab. XIII. Intensité de la gommose selon les types de structure spatiale dans les sites d'étude. ..	71
Tab. XIV. Résultats du modèle linéaire généralisé à effets mixtes (GLMM) testant l'effet des bassins de production d'agrumes, du nombre d'individus et de la surface terrière sur IG avec le taux d'ombrage comme effet aléatoire.	72
Tab. XV. Profil des producteurs d'agrumes interrogés.....	73
Tab. XVI. Comparaison entre les types de structure spatiale des agrumes déclarés par les producteurs et ceux effectivement adoptés dans les SAFC.	74
Tab. XVII. Description des variables exogènes liées à la disposition des agrumes dans les SAFC	74
Tableau 18. Résultats de l'analyse de régression linéaire multiple permettant la sélection des variables explicatives en lien avec la variable à expliquer sur les espèces d'agrumes.	77
Tableau 19. Score des variables importantes dans la projection en relation avec IG sur les différentes espèces d'agrumes.....	79
Tab. XX. Efficacité de <i>Trichoderma asperellum</i> PR11 et PR12 vis-à-vis de <i>Phytophthora</i> spp.	86

LISTE DES ABREVIATIONS

AgNP	Nanoparticules à base de nitrate d'argent
GLMM	<i>General Linear Mixed Model</i>
IG	Intensité de la gommose
IRAD	Institut de Recherche Agricole pour le Développement
LP-IRAD	Laboratoire Central de Phytopathologie de l'IRAD
PARBPH	Pymaricine, ampicilline, rifampicine, bénomyle, pentachloronitrobenzène, hymexazole
PLS	<i>Partial Least Square</i>
SAFC	Systèmes agroforestiers à base de cacaoyers
Td _{EA}	Extrait aqueux de <i>Tithonia diversifolia</i>
ZAE	Zone agroécologique

RESUME

La stratégie qui consiste à s'appuyer sur les processus écologiques d'intérêt pour maximiser la productivité et la durabilité, tout en réduisant l'utilisation d'intrants chimiques, est de plus en plus acceptée et prônée. Les agroécosystèmes représentent ainsi une voie privilégiée pour les systèmes agricoles résilients et futurs. Cependant, l'optimisation des systèmes existants, du moins pour ce qui est de la régulation des bioagresseurs, requiert la compréhension des interactions entre les conditions environnementales au sein des exploitations, la dynamique des agents pathogènes, la nature des populations hôtes, ainsi que les interventions des agriculteurs. L'objectif de cette étude était d'identifier les principaux facteurs de risque épidémiologique de la gommose à *Phytophthora* et la mise au point une stratégie de gestion intégrée. Le premier objectif de cette étude visait à évaluer l'intensité de la gommose des agrumes, et d'identifier les principales espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes dans les zones de forêt tropicale du Cameroun. Les observations ont été faites sur 1521 agrumes répartis dans 05 systèmes de production ; à savoir les jardins familiaux, les vergers purs, les vergers associés à des cultures annuelles, les vergers associés à d'autres arbres fruitiers et enfin les systèmes agroforestiers à base de cacao (SAFC). L'intensité de la gommose a été mesurée proportionnellement à la circonférence du collet des agrumes pendant deux sessions d'observation. Des échantillons de plantes et de sol prélevés dans les vergers ont permis d'isoler, caractériser et identifier les *Phytophthora* spp. inféodées aux agrumes. Les résultats ont montré que les jardins de case et les vergers associés à des cultures annuelles sont les systèmes de culture les plus propices à la propagation de la maladie. Quatre espèces à savoir : *Phytophthora citrophthora*, *P. nicotianae*, *P. palmivora* et *P. cinnamomi* ont été identifiées comme celles responsables de la gommose dans la zone d'étude. *P. citrophthora* était présent dans tous les sites, avec une prévalence de près de 80 %. Cette étude a permis de mettre en évidence la forte intensité de la gommose dans les zones de forêt humides du Cameroun et de connaître les espèces de *Phytophthora* infestant les agrumes au Cameroun. Le second objectif était d'évaluer l'effet combiné du taux d'ombrage et de la structure spatiale des agrumes dans les SAFC sur l'intensité de la gommose. Pour cela, un réseau de 33 SAFC de 2500 m² a été établi dans cinq bassins de production d'agrumes dans les zones forestières humides du Cameroun. La structure spatiale (régulière, agrégée ou aléatoire) des agrumes a été analysée par la méthode de Ripley. Les données de terrain ont été utilisées pour reconstruire les SAFC en 3D. Des simulations statiques, avec superposition des ombres ont été effectuées sur la période allant du 1^{er} janvier au 31 décembre 2020, pour chacune des parcelles, à l'aide de ShadeMotion. Le taux d'ombrage reçu par chaque agrume a été calculé, et ces derniers ont été regroupés en trois classes (ombre dense, ombre légère

ou pas d'ombre) en fonction du taux d'ombrage qu'ils recevaient. Les agrumes ayant une structure spatiale régulière et situés sous un ombrage dense ou léger ont présenté une faible intensité de PFRD. Les agrumes ayant une structure spatiale agrégée, indépendamment de leur situation d'ombrage, ainsi que ceux ayant une structure spatiale aléatoire mais situés en plein soleil, ont montré une intensité de la gommose significativement élevée par rapport à tous les autres. Ces résultats montrent qu'une optimisation de l'effet combiné du taux d'ombrage et de la structure spatiale des arbres associés permettrait de concevoir des modèles optimaux de systèmes agroforestiers résilients, capables d'autoréguler les ravageurs et de réduire l'utilisation de pesticides chimiques. Le troisième objectif de cette étude était de déterminer les facteurs de risque épidémiologiques de la gommose sur les trois principales espèces d'agrumes cultivées au Cameroun. Des données pédologiques, climatiques et agronomiques ont été collectées, lesquelles ont permis de définir 39 variables explicatives. L'intensité de la gommose mesurée sur 2364 individus représentant trois espèces d'agrumes (*Citrus paradisi*, *C. reticulata* et *C. sinensis*) a permis de définir trois variables expliquées. Après une série de tris par la méthode de régression *Partial Least Square* (PLS), le modèle final a permis de retenir sept variables dont : la température, les précipitations, l'humidité du sol, l'humidité relative, le limon fin et la matière organique du sol ont été retenus comme seuls facteurs de risque épidémiologique de la gommose. Il ressort de ce travail que la prise en compte des spécificités environnementales est un prérequis capital pour l'implantation des vergers agrumicoles. La production des agrumes dans des systèmes diversifiés représente une voie à privilégier pour une régulation écologique de la gommose.

Mots clés : Protection des cultures, Gestion intégrée des bioagresseurs, Agroforesterie, transition agroécologique, Horticulture fruitière, Agrumes, *Phytophthora* et Forêts humides.

ABSTRACT

La stratégie qui consiste à s'appuyer sur les processus écologiques d'intérêt pour maximiser la productivité et la durabilité, tout en réduisant l'utilisation d'intrants chimiques, est de plus en plus acceptée et prônée. Les agroécosystèmes représentent ainsi une voie privilégiée pour les systèmes agricoles résilients et futurs. Cependant, l'optimisation des systèmes existants, du moins pour ce qui est de la régulation des bioagresseurs, requiert la compréhension des interactions entre les conditions environnementales au sein des exploitations, la dynamique des agents pathogènes, la nature des populations hôtes, ainsi que les interventions des agriculteurs. L'objectif de cette étude était d'identifier les principaux facteurs de risque épidémiologique de la gommose à *Phytophthora* et la mise au point une stratégie de gestion intégrée. Le premier objectif de cette étude visait à évaluer l'intensité de la gommose des agrumes, et d'identifier les principales espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes dans les zones de forêt tropicale du Cameroun. Les observations ont été faites sur 1521 agrumes répartis dans 05 systèmes de production ; à savoir les jardins familiaux, les vergers purs, les vergers associés à des cultures annuelles, les vergers associés à d'autres arbres fruitiers et enfin les systèmes agroforestiers à base de cacao (SAFC). L'intensité de la gommose a été mesurée proportionnellement à la circonférence du collet des agrumes pendant deux sessions d'observation. Des échantillons de plantes et de sol prélevés dans les vergers ont permis d'isoler, caractériser et identifier les *Phytophthora* spp. inféodées aux agrumes. Les résultats ont montré que les jardins de case et les vergers associés à des cultures annuelles sont les systèmes de culture les plus propices à la propagation de la maladie. Quatre espèces à savoir : *Phytophthora citrophthora*, *P. nicotianae*, *P. palmivora* et *P. cinnamomi* ont été identifiées comme celles responsables de la gommose dans la zone d'étude. *P. citrophthora* était présent dans tous les sites, avec une prévalence de près de 80 %. Cette étude a permis de mettre en évidence la forte intensité de la gommose dans les zones de forêt humides du Cameroun et de connaître les espèces de *Phytophthora* infestant les agrumes au Cameroun. Le second objectif était d'évaluer l'effet combiné du taux d'ombrage et de la structure spatiale des agrumes dans les SAFC sur l'intensité de la gommose. Pour cela, un réseau de 33 SAFC de 2500 m² a été établi dans cinq bassins de production d'agrumes dans les zones forestières humides du Cameroun. La structure spatiale (régulière, agrégée ou aléatoire) des agrumes a été analysée par la méthode de Ripley. Les données de terrain ont été utilisées pour reconstruire les SAFC en 3D. Des simulations statiques, avec superposition des ombres ont été effectuées sur la période allant du 1^{er} janvier au 31 décembre 2020, pour chacune des parcelles, à l'aide de ShadeMotion. Le taux d'ombrage reçu par chaque agrume a été calculé, et ces derniers ont été regroupés en trois classes (ombre dense, ombre légère

ou pas d'ombre) en fonction du taux d'ombrage qu'ils recevaient. Les agrumes ayant une structure spatiale régulière et situés sous un ombrage dense ou léger ont présenté une faible intensité de PFRD. Les agrumes ayant une structure spatiale agrégée, indépendamment de leur situation d'ombrage, ainsi que ceux ayant une structure spatiale aléatoire mais situés en plein soleil, ont montré une intensité de la gommose significativement élevée par rapport à tous les autres. Ces résultats montrent qu'une optimisation de l'effet combiné du taux d'ombrage et de la structure spatiale des arbres associés permettrait de concevoir des modèles optimaux de systèmes agroforestiers résilients, capables d'autoréguler les ravageurs et de réduire l'utilisation de pesticides chimiques. Le troisième objectif de cette étude était de déterminer les facteurs de risque épidémiologiques de la gommose sur les trois principales espèces d'agrumes cultivées au Cameroun. Des données pédologiques, climatiques et agronomiques ont été collectées, lesquelles ont permis de définir 39 variables explicatives. L'intensité de la gommose mesurée sur 2364 individus représentant trois espèces d'agrumes (*Citrus paradisi*, *C. reticulata* et *C. sinensis*) a permis de définir trois variables expliquées. Après une série de tris par la méthode de régression *Partial Least Square* (PLS), le modèle final a permis de retenir sept variables dont : la température, les précipitations, l'humidité du sol, l'humidité relative, le limon fin et la matière organique du sol ont été retenus comme seuls facteurs de risque épidémiologique de la gommose. Il ressort de ce travail que la prise en compte des spécificités environnementales est un prérequis capital pour l'implantation des vergers agrumicoles. La production des agrumes dans des systèmes diversifiés représente une voie à privilégier pour une régulation écologique de la gommose.

Mots clés : Protection des cultures, Gestion intégrée des bioagresseurs, Agroforesterie, transition agroécologique, Horticulture fruitière, Agrumes, *Phytophthora* et Forêts humides.

INTRODUCTION

Les agrumes représentent la plus grande catégorie de production fruitière dans le monde. Bien loin devant la pastèque, la banane et la pomme, ils sont le premier groupe de fruits en termes de production et de commerce. La production mondiale d'agrumes s'élève ainsi à plus de 158,5 millions de tonnes (Liu et *al.*, 2012; Chen et *al.*, 2019; Ollitrault et *al.*, 2020). Les agrumes sont principalement produits pour leurs fruits, lesquels sont consommés frais ou après transformation en jus ou en confitures (Hussain et *al.*, 2021; Noorizadeh et *al.*, 2022). Les agrumes sont riches en micro et macronutriments. Les produits à base d'agrumes sont largement utilisés dans les industries alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques en raison de leur parfum puissant et de leurs propriétés thérapeutiques (Adenaike et Abakpa, 2021; Raghavan et Gurunathan, 2021). La culture des agrumes est répandue dans plus de 140 pays des régions tropicales et subtropicales du monde entier. La Chine, le Brésil, l'Inde et le Mexique sont les principaux pays producteurs d'agrumes. En effet, 51 % des agrumes sont produits en Asie, et 52 % des exportations d'agrumes (7,2 millions de tonnes) proviennent de la région méditerranéenne (Chen et *al.*, 2019). En Afrique subsaharienne, les grands pays producteurs d'agrumes sont le Nigeria, l'Afrique du Sud, la Guinée et le Sénégal (Biyon et *al.*, 2022).

Au Cameroun, les agrumes occupent une place prépondérante dans la richesse horticole et jouent un rôle socio-économique et écologique important. En plus de leur apport dans la sécurité alimentaire et sanitaire, les agrumes constituent une source de diversification des revenus des producteurs, ainsi qu'un élément de restauration des équilibres écologiques après la déforestation (Ndo et *al.*, 2019a). Les principales espèces d'agrumes cultivées au Cameroun sont *C. sinensis*, *C. reticulata*, *C. paradisi*, *C. maxima* et *C. limon* (Ndo, 2011). Alors que Temple (2001) estimait la production nationale d'agrumes à 22 792 tonnes, la FAO (2023) l'évalue à 250 tonnes. Ces chiffres montrent que, non seulement la production locale d'agrumes est mal connue, mais surtout qu'elle est faible et loin de satisfaire la demande nationale, qu'on estimerait à environ 278 000 tonnes par an. Cette estimation est faite sur la base de la consommation moyenne en oranges fraîches par habitant/an des pays de la Communauté Européenne estimée à environ 10 Kg (Spreen, 2001; Spreen et *al.*, 2020). Les marges d'accroissement sont donc énormes, étant donné que le Cameroun dispose des conditions écologiques favorables à la production des agrumes dans l'ensemble du territoire. On observe également une forte présence d'agrumes dans les bassins de production ainsi qu'un engouement de la part des producteurs à se lancer dans l'agrumiculture. Fort de ce constat, le Plan National d'Investissement Agricole considère l'arboriculture fruitière comme une filière émergente dont la productivité et la compétitivité doivent être améliorées (Anonyme, 2014).

La stagnation de la production d'agrumes au Cameroun est due à diverses contraintes, dont la principale est la forte pression parasitaire (Ndo et *al.*, 2019a; Biyon et *al.*, 2022). La pourriture du collet des agrumes, communément appelée gommose est la plus importante maladie tellurique sur les agrumes dans le monde et même au Cameroun (Chaudhary et *al.*, 2020; Jaouad et *al.*, 2020; Sawake et *al.*, 2022). Elle est causée par une diversité d'espèces appartenant au groupe des Oomycètes, et du genre *Phytophthora*. Des 318 espèces du genre *Phytophthora* décrites à ce jour, 13 sont inféodées aux agrumes et causent d'importants dégâts, même dans les plus grandes zones de production agrumicoles (Meitz-Hopkins et *al.*, 2014; Rajput et *al.*, 2020; Bose et *al.*, 2021). *P. nicotianae*, *P. palmivora*, et *P. citrophthora* sont les espèces qui causent le plus de dégâts sur les agrumes dans les zones tropicales (Alvarez et *al.*, 2008; Graham et Feichtenberger, 2015). Les pertes de production dues à la gommose sont substantiellement estimées à 30 % de la production potentielle (Mounde et *al.*, 2008; Tariq et *al.*, 2021). En dehors des pertes agronomiques et économiques, la gommose précipite la mort des agrumes ce qui réduit la durée de vie des vergers (Scott et *al.*, 2019).

Peu de travaux ont été faits sur la gommose au Cameroun. On peut néanmoins citer l'enquête menée entre 2013 et 2015 dans les localités d'Obala, Bokito et Muyuka. Cette étude a montré que 90 % des plantations sont affectées par la gommose avec des sévérités de l'ordre de 35 % (Akoutou Mvondo, 2015). Une autre étude a montré que la gommose est la principale cause de dépérissement des agrumes dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (SAFC) (Akoutou Mvondo et *al.*, 2020). Par-delà de ces informations préliminaires, les espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes au Cameroun sont méconnues. Les agrumes étant principalement produits dans les SAFC (Ndo, 2011), les interactions possibles entre les caractéristiques structurales du système et les agents pathogènes ne sont pas élucidées. Les facteurs de risque épidémiologique pour les différents bassins de production ne sont pas déterminés. Enfin, aucune stratégie de gestion de la maladie n'est prévue par les autorités sanitaires et à notre connaissance, aucun produit phytosanitaire spécifique à la gommose n'est mis à la disposition des producteurs.

La gestion de la gommose se fait généralement par l'adoption d'un ensemble de techniques prophylactiques, la lutte chimique et biologique (Gade et Lad, 2019). Au Cameroun cependant, l'essentiel de la production d'agrumes est fourni par de petits exploitants agricoles. Les systèmes de production sont traditionnels, et les pratiques culturelles empiriques (Kuate et *al.*, 2006 ; Ndo, 2011). Les espèces d'agrumes utilisées ne sont pas toujours tolérantes aux maladies et la majorité des vergers sont mises en place avec des plants de semis, donc non-résistants aux maladies. De plus, les maladies du sol représentent une menace considérable dans la production végétale, du fait du coût élevé des méthodes de lutte et du développement de résistances aux fongicides chimiques

(Gade et Lad, 2019; Sawake et *al.*, 2022). En outre, les préoccupations sans cesse croissantes concernant la santé de l'environnement et des sols invitent à la recherche des moyens de lutte écologiques (Sharma et *al.*, 2019; Panth et *al.*, 2020).

La stratégie qui consiste à s'appuyer sur les processus écologiques d'intérêt pour maximiser la productivité et la durabilité, tout en réduisant l'utilisation d'intrants chimiques, est de plus en plus prônée et acceptée. Les agroécosystèmes représentent ainsi une voie privilégiée pour les systèmes agricoles futurs et résilients (Bennett et *al.*, 2021). En effet, inspirés des écosystèmes naturels, qui sont le résultat d'une adaptation des communautés animales et végétales dans un environnement donné, et donc à des contraintes biotiques et abiotiques spécifiques, ces systèmes constituent un modèle de durabilité et de résilience (Ngo Bieng et *al.*, 2017; Motisi et *al.*, 2022). Parmi les caractéristiques des écosystèmes naturels, la diversité des espèces est supposée jouer un rôle clé dans la durabilité et la multifonctionnalité des systèmes agroforestiers (Malézieux, 2012). Ainsi, une augmentation de la diversité végétale dans les agroécosystèmes est supposée améliorer la fourniture de nombreux services écosystémiques, notamment la régulation des ravageurs (Ratnadass et *al.*, 2012; Motisi et *al.*, 2022; Schreefel et *al.*, 2020; Ndo et *al.*, 2023). Ces processus agroécologiques sont également amplifiés par l'intégration des méthodes de lutte biologique et organique.

La lutte biologique est désormais reconnue comme une alternative durable et économique à l'utilisation de pesticides chimiques de synthèse (Heimpel et Mills, 2017 ; Mousumi Das et *al.*, 2019). La lutte biologique permet de contrôler les agents pathogènes en utilisant les antagonistes naturels de ces derniers (Mbarga et *al.*, 2020; Tariq et *al.*, 2020 Degani et Dor, 2021). Parmi les agents fongiques de biocontrôle, plusieurs espèces du genre *Trichoderma* sont largement utilisées et constituent la base de plusieurs produits commerciaux de biocontrôle (Zapata-Sarmiento et *al.*, 2020). En effet, les *Trichoderma* sont des champignons endophytes qui synthétisent divers métabolites secondaires ayant une activité antibiotique. Ils sont connus pour leur capacité à parasiter les champignons phytopathogènes et sont utilisés avec succès pour le biocontrôle d'une diversité de phytopathogènes des semences et du sol (Mousumi Das et *al.*, 2019; Sandani et *al.*, 2019; Degani et Dor, 2021). En dehors des agents de lutte biologique, l'optimisation des molécules organiques par les moyens de la chimie verte connaît également un essor dans le domaine de la gestion des bioagresseurs des plantes.

Les nanoparticules sont largement utilisées dans les industries agroalimentaires et agricole. Elles sont de ce fait utilisées comme nano-fertilisants, nano-pesticides, porteurs de pesticides conventionnels, et conservateurs alimentaires (Ibrahim, 2019). Ainsi, la synthèse des nanoparticules a gagné en intérêt croissant. Les organes tels que les feuilles peuvent être récoltés

sans retirer l'arbre de la nature, et ils regorgent de diverses molécules phytochimiques bénignes et respectueuses de l'environnement (Bhat et *al.*, 2013). En outre, la production des nanoparticules via la méthode biosynthétique démontre de grandes propriétés telles que le comportement écologique, le faible coût, la simplicité du processus de synthèse, et la performance supérieure par rapport aux méthodes de synthèse physique et chimique. Cette approche est basée sur des extraits de feuilles et est absolument exempte de produits chimiques dangereux. De plus, le mécanisme de bio-réduction de l'ion métallique en nanoparticules métalliques est assez rapide, facilement réalisable à température ambiante et facilement adaptable.

Le tétraèdre de la maladie proposé par Zadoks (2001) résume l'ensemble des facteurs dont les interactions peuvent influencer l'expression d'une maladie. Ces facteurs peuvent être notamment les conditions environnementales dans l'exploitation, la biologie de l'agent pathogène, son mode de dispersion et la nature génétique de l'hôte, ainsi que les interventions du producteur. En se basant sur des modèles épidémiologiques connus, cette étude est basée sur quatre questions de recherche, notamment celles de savoir : (i) quelles sont les espèces du genre *Phytophthora* inféodées aux agrumes au Cameroun ? (ii) les caractéristiques structurales des SAFC influencent-elles IG sur les agrumes au sein desdits agrosystèmes ? (iii) quels sont les facteurs abiotiques, biotiques et agronomiques qui déterminent IG dans les zones de forêts humides du Cameroun ? Et enfin (iv) quels agents biologiques pourraient lutter efficacement contre les *Phytophthora* inféodés aux agrumes ? L'hypothèse de recherche étant que la connaissance des facteurs de risque épidémiologique et la mise en évidence des moyens de gestion biologique, permettraient de mettre sur pied des protocoles de gestion intégrée, moins onéreux, écologiquement acceptables et facilement intégrables dans les habitudes et les systèmes de cultures existants. L'objectif général de ce travail est d'identifier les principaux facteurs de risque épidémiologique de la gommose sur les agrumes permettant de mettre au point une stratégie de gestion intégrée. De manière spécifique, l'étude vise à :

- (i) décrire la situation épidémiologique de la gommose sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun ;
- (ii) évaluer l'effet des caractéristiques structurales des SAFC sur IG sur les agrumes ;
- (iii) déterminer les facteurs de risque épidémiologique de la gommose sur les principales espèces d'agrumes produites au Cameroun ;
- (iv) tester *in vitro* le potentiel fongicide de *T. asperellum* et celui des nanoparticules de nitrate d'argent à base d'extraits de *T. diversifolia* sur les espèces de *Phytophthora* spp. identifiées.

Cette thèse n'a pas été faite en vase clos. Mais, elle a été conçue de manière holistique, et explore dans une approche pluridisciplinaire, l'hypothèse émise. De ce fait, elle répond aux missions de la Division de la Production Végétale de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) notamment sur l'élaboration des méthodes et outils d'appui conseil, mais également sur la production et la gestion des connaissances et informations utiles à l'action gouvernementale sur les filières végétales. Ce travail est également en étroite ligne avec les Objectifs de Développement Durables horizon 2030, en particulier les ODD1, 2, 3 et 12.

L'intérêt de cette étude tient sur les plans académique, socioéconomique, environnemental et sanitaire. Sur le plan académique, ce travail amorce la mise en lumière des espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes dans les zones humides du Cameroun. Aussi, cette étude étaye notre compréhension sur le potentiel des SAFC dans la gestion des bioagresseurs, à travers l'ombrage et la structure spatiale. Sur le plan socioéconomique, l'étude présente des résultats pratiques qui peuvent orienter les agriculteurs dans le choix des systèmes de production des agrumes. L'étude montre également le potentiel des agents de lutte biologique dans la gestion des *Phytophthora*. Sur le plan environnemental, ce travail contribue à développer une stratégie de gestion intégrée des *Phytophthora* en orientant la production des agrumes dans des systèmes agroforestiers et l'usage d'agents de lutte biologique. Cette stratégie est en étroite ligne avec la démarche préconisée pour aborder la transition agroécologique.

Le document est présenté en quatre chapitres dont le premier est une revue de la littérature sur les déterminants clés de l'étude. Ce chapitre présente donc succinctement les agrumes, la gommose et la biologie des *Phytophthora*, les interactions entre les caractéristiques structurales des SAFC et les agents pathogènes, et enfin les moyens de gestion biologique des *Phytophthora*. Le second chapitre présente la méthodologie générale qui a été utilisée pour atteindre les objectifs ci haut énoncés. Quant au troisième chapitre, il présente les résultats obtenus ainsi qu'une discussion de ceux-ci ; et le quatrième chapitre enfin, présente la conclusion générale, les perspectives et les recommandations.

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le présent chapitre présente la revue de la littérature liée à cette étude. La première section (I.1.) de ce chapitre présente l'état de l'art sur les agrumes de manière globale et la situation particulière au Cameroun. La deuxième section (I.2.) présente les généralités sur les *Phytophthora* et leur impact sur la production végétale en général et les agrumes en particulier. Quant à la troisième section (I.3.), les différents systèmes de production des agrumes au Cameroun sont présentés et un accent particulier est mis sur le système agroforestier à base de cacaoyers (SAFC). À ce propos, les interactions entre les caractéristiques structurales des SAFC et les bioagresseurs sont succinctement présentées. Enfin, la dernière section (I.4.) présente un condensé sur l'utilisation des agents biologiques dans la gestion des agents pathogènes, dont les *Phytophthora* en particulier.

I.1. Agrumes

I.1.1. Généralités sur les agrumes

I.1.1.1. Origine, distribution géographique et diversité spécifique des agrumes

Les agrumes sont originaires de l'Asie du Sud-Est (Talon et *al.*, 2020). Trois principaux foyers de diffusion primaire ont été identifiés, dont le premier est celui du Nord-Est indien. Ledit foyer serait le bassin de diversification de *Citrus medica*, *C. aurantifolia*, *C. limon*, *C. aurantium* et *C. sinensis*. Le second foyer de diversification est celui de la Malaisie et l'Indonésie d'où *C. grandis* serait originaire. Enfin, le troisième foyer de diversification est celui du Vietnam, de la Chine et du Japon, qui seraient la zone de diversification de *C. reticulata* (Ollitrault et Navarro, 2012 ; Talon et *al.*, 2020). La diffusion des agrumes s'est faite progressivement dans le temps et l'espace. Après l'Europe et le bassin méditerranéen, les agrumes ont été introduits en Afrique du Nord vers le XIV^e siècle. Les agrumes seraient ensuite introduits en Amérique et dans le bassin du Congo par des explorateurs portugais vers le 18^e siècle (Chen et *al.*, 2019).

L'expression 'agrumes' renvoie à un terme générique désignant plusieurs espèces végétales appartenant à la famille des *Rutaceae*. Ce groupe est constitué des genres botaniques *Citrus*, *Fortunella* et *Poncirus*. Cependant, la plupart des espèces cultivées sont du genre *Citrus* (Ollitrault et Navarro, 2012; Chen et *al.*, 2019; Ollitrault et *al.*, 2020). Le genre *Citrus* appartient à la Sous-tribu des *Citrinae*, Tribu des *Citreae*, Sous-famille des *Aurantioideae*, Famille des *Rutaceae*, Ordre des *Geraniales*. La classification spécifique du genre est assez complexe et le nombre d'espèces exact est indéterminé (Bowman et Joubert, 2020). Ainsi dans la littérature, on dénombre entre 16 et 156 espèces, selon que les auteurs aient pris en compte ou non les multiples hybrides (Ollitrault et *al.*, 2020; Talon et *al.*, 2020). Toutefois, seules huit espèces sont d'importance économique. Il s'agit de : *C. sinensis* (L.) l'oranger ; *C. aurantium* (L.) le bigaradier ; *C. reticulata* (Blanco) le

mandarinier ; *C. paradisi* (Macf.) le pomelo ; *C. maxima* (Burn. Merr.) le pamplemoussier ; *C. limon* (L. Burm) le citronnier ; *C. aurantifolia* (Christm. Swing.) le limettier et *C. medica* (L.) le cédratier (Liu et al., 2012; Spreen et al., 2020).

I.1.1.2. Écologie et phénologie des agrumes

Les agrumes ont une forte capacité d'adaptation à des conditions pédoclimatiques variées, ce qui justifie leur présence dans une large aire géographique autour du globe. En effet, les agrumes sont cultivés dans toutes les zones où la température moyenne annuelle est comprise entre 13-39 °C. Par ailleurs, la plupart des agrumes résistent jusqu'à -5 °C, et certaines espèces comme le bigaradier, peuvent résister au gel et supporter jusqu'à -20 °C (Agustí et al., 2014). Les climats maritimes subtropicaux leur sont favorables et des apports en eau compris entre 1200 et 1500 mm représentent le seuil en dessous duquel l'irrigation est nécessaire. Les agrumes se développent bien sur des sols profonds, riches en limon, sablo-argileux ou encore argilo-sableux, bien drainés, avec $5,5 \leq \text{pH} \leq 7,5$. L'optimum d'altitude pour une bonne croissance se situe entre 1000 et 1300 m (Agustí et al., 2014). La lumière joue également un rôle substantiel, car la qualité et la coloration des fruits en dépendent (Chen et al., 2019).

Le développement de la frondaison chez les agrumes se fait sous forme de flux végétatifs généralement appelés *flushs*. Ces derniers succèdent à des périodes d'arrêt végétatif et s'observent même en climat tropical humide où les conditions permettent une activité végétative continue (Chen et al., 2019). La floraison chez les agrumes se fait juste après la pousse qui suit le repos végétatif. Les fleurs se forment sur le bois de l'année précédente et peuvent être isolées ou en grappes. Toutefois, la floraison peut différer selon les espèces. On peut ainsi rencontrer une floraison continue sur les citronniers et limettiers ; tandis que sur les autres espèces, on peut avoir deux périodes de floraison par an (Srinivasan et al., 2019). Deux principales périodes de floraison sont observées dans la zone forestière du Cameroun. La première a lieu de mars à juin et la seconde entre septembre et décembre ; elles sont fonction des saisons pluvieuses (Ndo, 2011).

I.1.1.3. Production mondiale et importance économique des agrumes

Les agrumes représentent la plus importante culture fruitière au monde en termes de production et de commerce (Ollitrault et Navarro, 2012; Liu et al., 2012; Chen et al., 2019; Ollitrault et al., 2020). La production mondiale totale d'agrumes a dépassé 158 millions de tonnes en 2018, représentant ainsi la plus grande catégorie de production de fruits, devant la pastèque, la banane et la pomme (Fig. 1) (Chen et al., 2019).

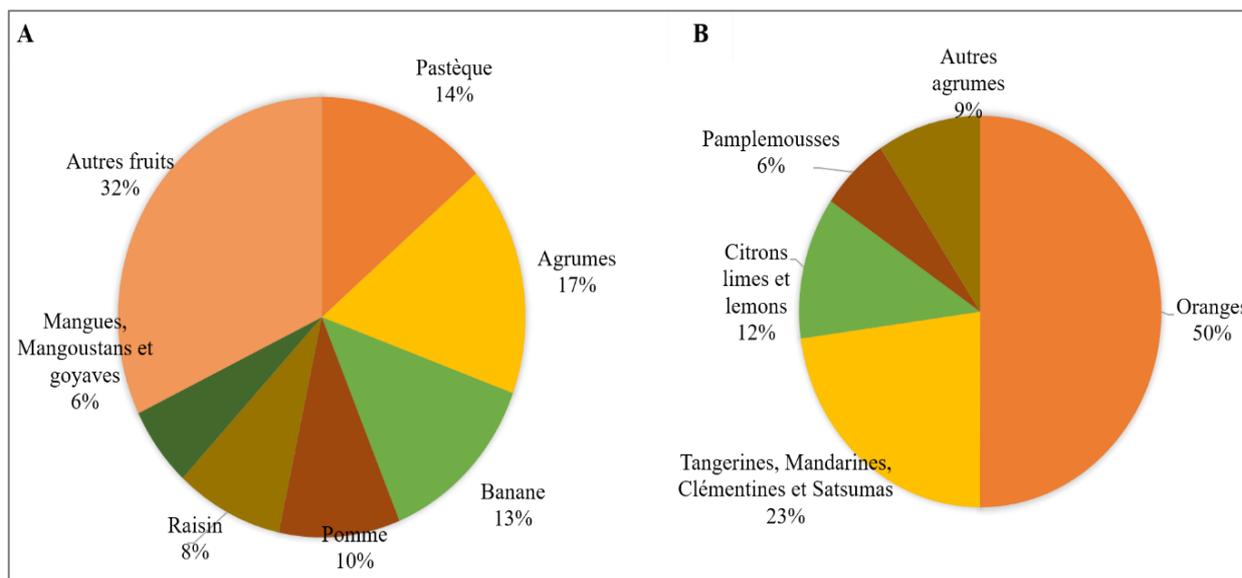


Fig. 1. Production globale des agrumes

(A) Part des agrumes dans la production fruitière globale et (B) proportion des principales espèces dans la production globale des agrumes (Chen et al., 2019)

À ce jour, les agrumes sont cultivés dans plus de 140 pays (Fig. 2). La superficie globale plantée d'agrumes est estimée à plus de 7,5 millions d'hectares sur une large aire géographique située à peu près entre les 40° de latitude Nord et Sud autour du globe (Agustí et al., 2014 ; Chen et al., 2019). Les oranges représentent environ 60 % de la production globale d'agrumes. Les mandarines, clémentines et satsumas comptent pour 23 % du volume mondial. Environ 13,7 millions de tonnes de citrons et de limes, ainsi que 4,4 millions de tonnes de pamplemousses et pomelos sont produites annuellement (Chen et al., 2019).

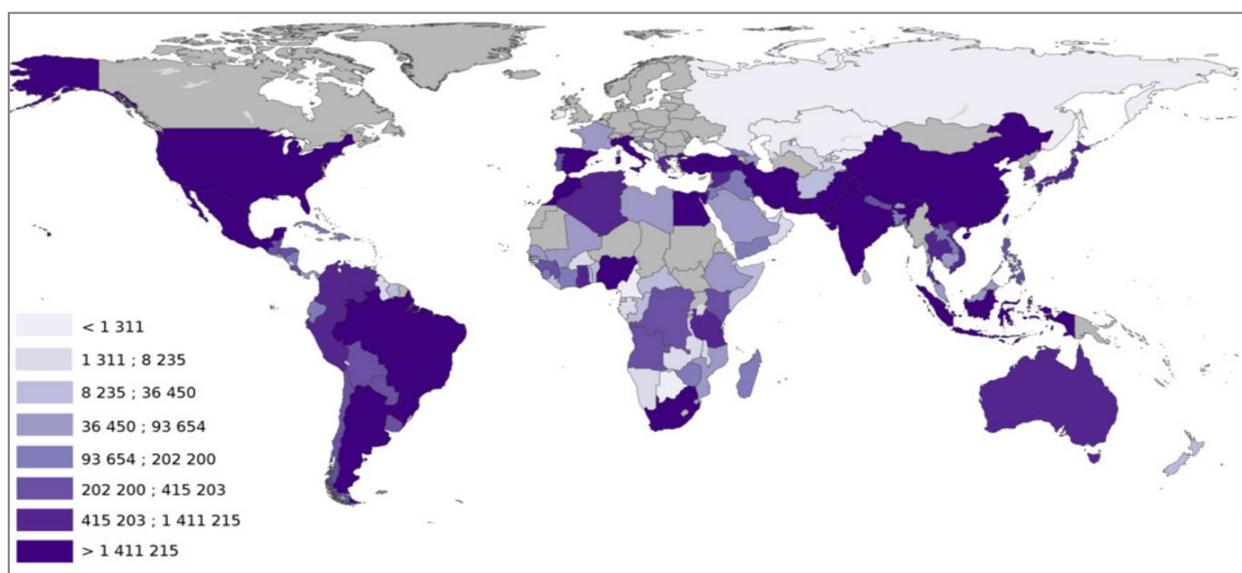


Fig. 2. Production mondiale des agrumes en tonnes (FAO, 2017).

Les rendements moyens des agrumes se situent entre 5,3 et 6,7 tonnes/ha/an. Mais en culture intensive, ces rendements peuvent être de l'ordre de 11 à 15,5 tonnes/ha/an. Le Brésil produit un quart de la production mondiale d'agrumes dont 75 % sont transformés en jus. La Chine et les États-Unis sont également d'importants producteurs avec respectivement 17,6 et 11 millions de tonnes. La région méditerranéenne est le plus grand exportateur de fruits frais. Les principaux importateurs sont l'Allemagne, la France, les Pays-Bas et le Royaume-Uni (Spren et *al.*, 2020).

I.1.1.4. Importance et utilisation des agrumes

Les agrumes sont principalement cultivés pour leurs fruits, lesquels sont consommés frais ou après transformation en jus, confitures ou liqueurs. Les huiles essentielles peuvent également être extraites des feuilles, des fleurs et des zestes de fruits (Chen et *al.*, 2019). Ces huiles sont utilisées dans les industries pharmaceutique, cosmétique, aromatique et alimentaire. Par ailleurs, les agrumes permettent d'améliorer la qualité de l'alimentation humaine, grâce à leurs richesses en fibres, vitamines et en sels minéraux. En effet, les agrumes sont une ressource précieuse de substances phytochimiques bénéfiques pour le corps humain comme la vitamine C, les vitamines B, le potassium, le phosphore et d'autres éléments (González-Stuart et Rivera, 2019).

Il existe également divers composés actifs extraits des agrumes utilisés contre les maladies cardiaques, et les traitements de l'hypertension (Srinivasan et *al.*, 2019). Les agrumes sont également utilisés comme anticancéreux, anti-inflammatoire, antiviral, antibactérien et antifongique. Le jus d'agrumes contient des enzymes considérées comme un outil naturel pour lutter contre l'obésité et contient toute une gamme de protéines différentes qui brûlent les graisses humaines (Abobatta, 2019). Aussi, il a été montré que la consommation d'agrumes pourrait améliorer les indices du statut antioxydant, et même la santé cardiovasculaire et la sensibilité à l'insuline (Turner et Burri, 2013).

I.1.2. Etat de l'agrumiculture au Cameroun

I.1.2.1. Importance locale des agrumes

Les agrumes sont importants au Cameroun à plus d'un titre. Ils interviennent dans la pharmacopée traditionnelle, et le biocontrôle de diverses pathologies (Bayaga et *al.*, 2017). Les agrumes constituent également une importante source de diversification des productions et des revenus des producteurs en milieu rural (Kuate et *al.*, 2006). Par ailleurs, grâce à leur pérennité, les agrumes représentent un élément de restauration des équilibres écologiques après la déforestation (Mbolo et *al.*, 2016). La production nationale d'agrumes est estimée à 194 tonnes (Fig. 3). Toutefois, il est à considérer que ce chiffre est largement sous-estimé, au regard de l'importance des agrumes au Cameroun, du nombre d'agrumes présents dans les vergers, et l'importance des agrumes dans les habitudes alimentaires et les revenus des populations (Ndo, 2011; Jagoret et *al.*, 2014).

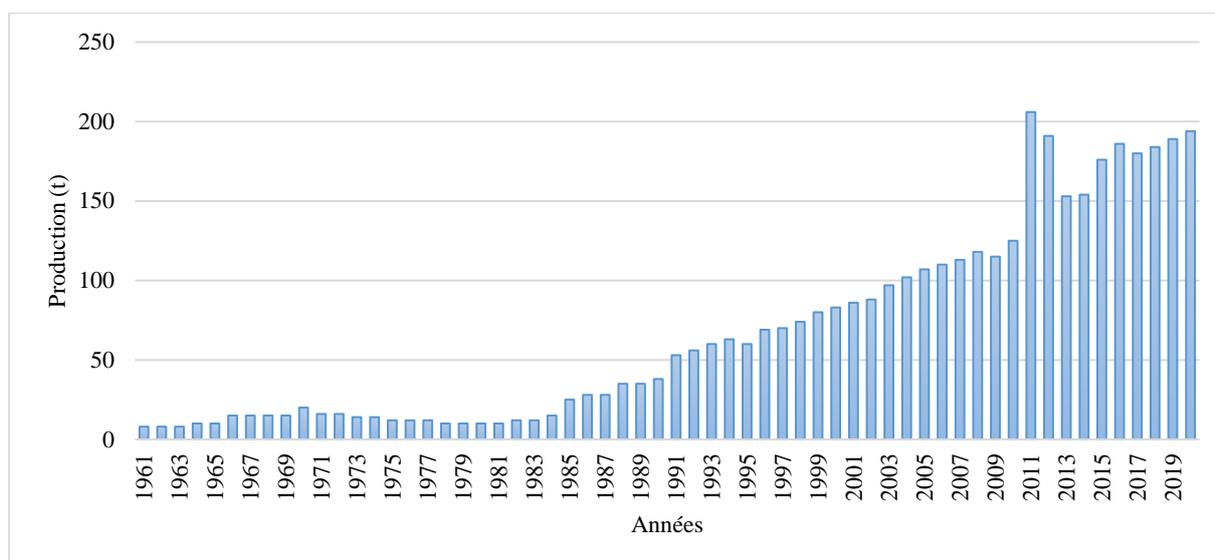


Fig. 3. Production des agrumes au Cameroun entre 1961 et 2020.

(Anonyme, 2023a)

I.1.2.2. Bassins de production et diversité spécifique des agrumes au Cameroun

L'agrumiculture est praticable dans l'ensemble du territoire camerounais du fait de sa diversité écologique. Cependant, l'essentiel de la production des agrumes est issu des bassins de production bien déterminés. Ceux-ci sont spécialisés en termes d'espèces et de quantités de production (Temple, 2001). Indifféremment des espèces produites, les principaux bassins de production sont situés dans la Région du Centre, notamment dans le Grand Mbam (Kédia, Bokito, Bafia, Ombessa et Mbangassina) ; ainsi que dans la Région du Littoral, précisément dans les départements du Mounjo (Njombé) et de la Sanaga Maritime (Pouma). Ces bassins de production représentent les principales localités qui ravitaillent en fruits frais les grandes villes du pays (Yaoundé et Douala), ainsi que les pays voisins (Aulong et *al.*, 2000 ; Temple, 2001 ; Ndo, 2011). D'autres bassins de production sont localisés dans les Régions administratives du Sud-Ouest, du Nord-Ouest, de l'Ouest, du Nord, de l'Est et du Sud.

Bien qu'une multitude de cultivars d'agrumes soient présente au Cameroun, cinq principales espèces sont couramment produites ; il s'agit de : l'oranger (*Citrus sinensis*), le mandarinier (*C. reticulata*), le pomélo (*C. paradisi*), le pamplemoussier (*C. maxima*) et le citronnier (*C. lemon*). Les orangers et les mandariniers sont prédominants en termes de production et de commerce (Ndo, 2011).

I.1.2.3. Systèmes de production des agrumes au Cameroun

Au Cameroun, l'agrumiculture est pratiquée dans divers systèmes de production. On les retrouve : (i) dans des systèmes de culture intensifs, (ii) des jardins de cases, (iii) des vergers associés aux cultures annuelles, (iv) des vergers semi-intensifs, associés à d'autres espèces d'arbres fruitiers et enfin (v) dans des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (SAFC) ou de caféiers (Ndo, 2011).

Les SAFC sont le système de culture d'agrumes le plus courant et le plus étudié dans la grande zone forestière du Cameroun. Dans ces exploitations, les agrumes sont parfois les arbres fruitiers les plus représentatifs en termes d'effectifs. Diverses études ont montré l'importance des agrumes dans les SAFC (Zapfack et *al.*, 2002 ; Mbolo et *al.*, 2016 ; Ndo et *al.*, 2019b ; Akoutou Mvondo et *al.*, 2020).

I.1.2.4 Contraintes de la production des agrumes

La production d'agrumes au Cameroun est estimée à 194 tonnes (Anonyme, 2023a). Celle-ci est faible et loin de satisfaire la forte demande nationale et sous-régionale. Pour justifier cette faible production d'agrumes, diverses contraintes socio-économiques et agronomiques sont évoquées (Kuate et *al.*, 2006). En effet, les problèmes fonciers, les difficultés liées à l'accès aux crédits, aux marchés, aux intrants agricoles ; la non maîtrise des bonnes pratiques culturales et l'accès limité au matériel végétal de qualité constituent les limites à l'essor de l'agrumiculture dans le pays (Degrande et *al.*, 2006 ; Kuate et *al.*, 2006). Par-dessus toutes ces limites cependant, la forte pression parasitaire en constante évolution dont les agrumes font face, constitue la contrainte majeure à leur production (Kuate et *al.*, 2006; Ndo et *al.*, 2019a).

En effet, les conditions agroécologiques favorables au développement des agrumes permettent également l'épanouissement d'une forte pression parasitaire qui limite considérablement l'essor de l'agrumiculture au Cameroun (Ndo, 2011). Les bioagresseurs induisent de lourdes pertes économiques liées non seulement aux dégâts causés sur la production et la durée de vie des arbres dans les vergers ; mais également les mises en quarantaine et l'interdiction des exportations des ressources agrumicoles vers d'autres zones de production (Jeger et *al.*, 2017). Les bioagresseurs des agrumes peuvent être regroupés en deux catégories : les ravageurs et les maladies.

I.1.2.4.1. Principaux ravageurs des agrumes

Les agrumes sont attaqués par une diversité d'insectes ravageurs. Certains se nourrissent aux dépens de la plante, d'autres sont des vecteurs de maladies graves comme la Tristeza (*Citrus Tristeza Clotero virus*), le Huanglongbing (HLB) (Bassanezi et *al.*, 2020). Les ravageurs des agrumes sont les arachnides, les mollusques, les nématodes et les insectes. Bien que les trois premiers groupes soient importants, les insectes restent les principaux ravageurs des agrumes. Selon leurs grands groupes on distingue: (i) les Coléoptères (*Agrilus auriventris*, *Anoplophora chinensis*, *Tropinota hirta*...); (ii) les Diptères (*Ceratitis capitata*, *Bactrocera minax*, *B. tsuneonis*...); (iii) les Hémiptères (exp: *Aonidiella aurantii*, *Toxoptera citridus*, *Iceapurchase*, *Ceroplastes sinensis*, *Lepidosaphesbeckii*, *Dialeurodecitrii*...); (iv) les Lépidoptères (*Hemithea aestivaria*, *Gymnoscelis rufifasciata*, *Hypercompe* sp., *Cnephasia jactatana*, *Prayscitri*...) et (v)

les Thysanoptères (*Franckliniella bispinosa*, *Heliiothripshae morrhoidalis*, *Scirtothri pssp.*) (Khanchouch et al., 2017 ; Jaouad et al., 2020 ; Khanramaki et al., 2021).

I.1.2.4.2. Maladies des agrumes

Les maladies chez les agrumes sont causées par une diversité d'organismes vivants. On a ainsi des maladies virales, bactériennes et fongiques. Les viroïdes (ou agents pathogènes transmissibles par greffage) sont responsables des anomalies telles que l'exocortis, le nanisme chlorotique et la cachexie. Les agrumes sont hôtes de plus d'une quarantaine de virus. Cependant, les virus de la tristeza (CTV), de la psorose (CPV) et de la léprose (CLV), sont les plus notables économiquement (Tennant et al., 2009; Zhou et al., 2020).

Diverses bactéries causent des maladies sur les agrumes. *Xanthomonas axonopodis*, *Xylellafastidiosa* et *Candidatus Liberibacter* sont comptés parmi les plus importants. Bien plus que toutes les autres, *Candidatus Liberibacter* est de loin la plus illustre. Cet agent pathogène est présent dans diverses zones de production agrumicoles sous des formes variées, et est considéré comme la cause majeure de dépérissement des agrumes dans le monde (Jaouad et al., 2020)

Les agrumes sont sensibles à plus d'une centaine d'organismes fongiques et fongiformes. *Pseudocercospora angolensis*, *Fusarium* spp., *Penicillium* spp., *Aspergillus* spp., *Galactomyces citri-aurantii*, *Alternaria citri*, *Glomerella singulata*, *Botryotinia fuckeliana* et *Botryosphaeria rhodina* sont considérés comme les plus importants (Khanchouch et al., 2017). Les dégâts causés par ces agents pathogènes sont importants du fait de leur influence sur la durée de vie des arbres et des pertes de production qu'elles entraînent (Gade et Lad, 2019).

En Afrique tropicale, la Cercosporiose, causée par *Pseudocercospora angolensis* ; a souvent été considérée comme la maladie la plus dévastatrice connue sur les agrumes depuis le début des années 1950 (Brentu et al., 2013; Ndo et al., 2019a; Ndo et al., 2019b). Cependant, d'autres affections telle la gommose causent des dégâts importants sur les agrumes. A l'échelle globale, la gommose représente la maladie tellurique la plus importante connue sur les agrumes (Kroon et al., 2012 ; Jaouad et al., 2020). Des travaux antérieurs ont par ailleurs montré la forte intensité de la gommose sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun (Ndo et al., 2019b; Akoutou Mvondo et al., 2020).

I.2. Gommose des agrumes

I.2.1. Classification et taxonomie du genre *Phytophthora*

La gommose des agrumes est causée par une diversité d'espèces de *Phytophthora*. Ils appartiennent au Règne des *Stramenophila*, Phylum des *Oomycota* (Crous et al., 2015). Les

Oomycètes sont constitués de quatre ordres dont deux parmi eux (Saprolegniales et Peronosporales) contiennent d'importants phytopathogènes. Les deux autres Ordres contiennent de petits groupes d'organismes fongiformes généralement aquatiques. L'Ordre des Péronosporales (Tab. I), dans lequel l'on rencontre la famille des *Pythiaceae* contient des genres bien connus que sont les *Phytophthora* et les *Pythium* (Plaats-Niterink, 1981 ; Jung et al., 2019). La taxonomie du genre *Phytophthora* est difficile. Ceci est dû au fait que la plupart des critères d'identification utilisés sont flexibles, hautement influencés par l'environnement, et montrant un chevauchement entre les espèces qui, parfois ont des bases génétiques inconnues (Cooke et al., 2000). Néanmoins, depuis les travaux de Waterhouse (1963), des caractères morphologiques ont été retenus et servent de base d'identification et de taxonomie des espèces (Newhook et al., 1978; Stamps et al., 1990). Les *Phytophthora* peuvent dès lors être facilement identifiés par l'asepsie des hyphes, par leurs sporanges ovoïdes, obpyriformes, ou encore limoniformes, produits successivement sur une ramification typiquement symphonique et avec un sporangiophore indifférencié de croissance indéterminée.

Tab. I. Classification taxonomique des *Phytophthora* au sein des *Oomycota*

(Ho, 2018)	
Domaine	<i>Eukaryota</i>
Règne	<i>Straminipila (Chromista)</i>
Phylum	<i>Oomycota</i>
Class	<i>Oomycete</i>
Ordre	<i>Peronosporales</i>
Famille	<i>Pythiaceae</i>
Genre	<i>Phytophthora</i>

I.2.2. Diversité spécifique du genre *Phytophthora*

Le genre *Phytophthora* a eu de profondes répercussions sur l'histoire de l'humanité en provoquant, sur le plan agricole et écologique d'importantes maladies des plantes (Erwin et al., 1992). Depuis la description initiale de l'espèce type du genre par De Barry (1876), l'impact des *Phytophthora* a continué d'augmenter avec l'émergence de nouveaux agents pathogènes. Ainsi, au fil des années de nouvelles maladies et de nouvelles espèces du genre *Phytophthora* ont été découvertes sur diverses espèces végétales. Le nombre d'espèces connues dans le genre a de ce fait triplé au cours de la dernière décennie, grâce à des enquêtes approfondies dans des écosystèmes jusqu'alors inexplorés tels que les forêts naturelles (Hansen, 2015; Scanu et al., 2015; Jung et al., 2019), les cours d'eau et les systèmes d'irrigation (Yang et al., 2017), et les écosystèmes riverains (Hansen et al., 2012). Le nombre total d'espèces formellement nommées dans le genre était d'environ 58 en 1996 (Brazier, 1998). A ce jour, le nombre d'espèce de *Phytophthora* décrites varie entre 182 et

313 (Ho, 2018). La figure 4 ci-dessous illustre l'évolution du nombre d'espèces de *Phytophthora* identifiées dans le temps.

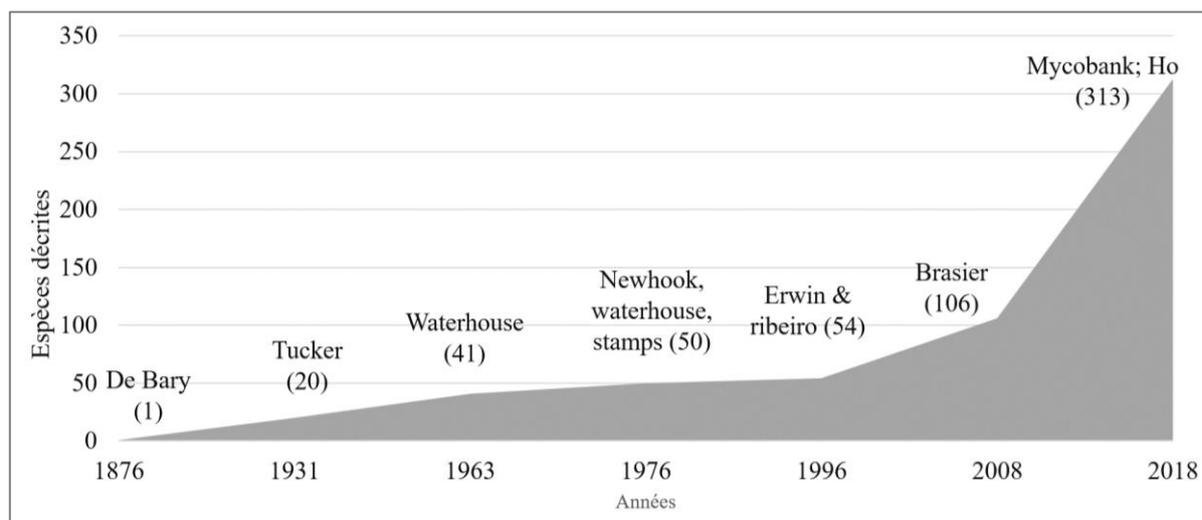


Fig. 4. Croissance temporelle du nombre d'espèces de *Phytophthora* formellement décrites

I.2.3. Historique et distribution géographique de la gommose des agrumes

Le nom *Phytophthora* vient des mots grecs *φυτόν* (phytón = plante) et *φθορά* (phthorá = destruction). Étymologiquement, les *Phytophthora* sont des “destructeurs de plantes”. Ce sont des protistes fongiformes de la classe des Oomycètes, phytopathogènes obligatoires, affectant un grand nombre de végétaux parmi lesquels plusieurs espèces de première importance pour l'homme (Erwin et al., 1992). Plusieurs espèces notoires de ce genre sont responsables d'épidémies historiques et courantes sur des plantes cultivées ainsi que sur des espèces forestières. L'espèce du genre la plus connue est *P. infestans*, responsable du mildiou de la pomme de terre, qui causa la famine d'Irlande de 1845 à 1852 (Turner, 2005). Un autre exemple est *P. ramorum*, agent pathogène de la mort subite du chêne (*Quercus* spp.), qui a tué des millions d'arbres et altéré de façon permanente les écosystèmes forestiers aux États-Unis, en Australie et en Europe (Jung et al., 2019).

Les *Phytophthora* sont responsables des dégâts sur les agrumes bien avant leur identification et leur définition en termes scientifiques (Virk et Nagpal, 2012). En effet, l'observation de l'écoulement de gomme sur tronc d'orangers aurait été signalée dès le 10^e siècle après J.C. en Espagne par le botaniste arabe *Ibn al-Awam*. Cependant, la première description assez claire des symptômes remonte en 1832 aux Iles Açores (Vanderweyen, 1974). La maladie semble s'être répandue au sein du bassin Méditerranéen, où elle a entraîné la disparition quasi-complète des orangers non greffés. Ainsi, après les Iles Açores entre 1832 et 1836, des épidémies dues aux *Phytophthora* sur agrumes ont été signalées dans diverses localités du globe entre 1841 et 1935 (Fawcett, 1936).

I.2.4. Importance économique des *Phytophthora*

Six espèces du genre *Phytophthora* sont classées parmi les 10 Oomycètes les plus dévastateurs. Il s'agit de : *P. infestans* (1^{er}) ; *P. ramorum* (2^{ème} ex aequo) ; *P. sojae* (4^{ème}) ; *P. capsici* (5^{ème}) ; *P. cinnamomi* (7^{ème}) et *P. parasitica* (8^{ème} ex aequo) (Kamoun et al., 2015). De manière globale, plus de 66 % de toutes les maladies des racines fines et plus de 90 % de toutes les pourritures du collet des plantes ligneuses sont causées par des espèces du genre *Phytophthora*. Ils représentent ainsi un important et émergent danger de biosécurité à l'échelle mondiale (Das et al., 2017; Hao et al., 2019; Kamoun et al., 2015; Kroon et al., 2012). *P. cinnamomi*, *P. nicotianae* et *P. sojae*, peuvent causer des maladies végétales hautement destructrices (Erwin et al., 1992; Brazier, 1998 ; Kroon et al., 2012).

Les *Phytophthora* sont responsables de la maladie tellurique et hydrique la plus importante sur les agrumes (Graham et Feichtenberger, 2015). Les espèces les plus importantes sont *P. parasitica* Dastur (Syn. *P. nicotianae*), *P. citrophthora*, et *P. palmivora* (Graham et Timmer, 1994; Graham et al., 2013). *P. nicotiana* et *P. citrophthora* sont les espèces qui causent le plus de dégâts dans le monde et sont de ce fait les plus importantes économiquement. Cependant, *P. parasitica* est l'espèce prédominante dans les zones tropicales et subtropicales. Généralement, c'est cette espèce qui est responsable des pourritures de racines et du tronc ; mais elle attaque rarement au-delà du collet (Graham et Timmer, 1994).

En dehors des attaques sur le collet, les dépérissements du feuillage et la pourriture des fruits, la pourriture racinaire à elle seule réduit la production de 46 %, pour des pertes estimées à 12,9 millions de dollars par an en Californie (Smith et Teague, 1989). Les pertes de rendement en Floride dues à la pourriture fibreuse des racines et aux attaques sur collets sont de l'ordre de 3 à 6 % par an, soit 30 à 60 millions de dollars (Graham et Timmer, 1994; Graham et Menge, 1999). Aussi, les pertes dues aux pourritures des racines sont substantiellement estimées entre 8 et 20 % de la production potentielle (Graham et Menge, 2000). Les *Phytophthora* sont ainsi responsables des pertes économiques importantes pour l'industrie des agrumes. Leur impact est perceptible dans toutes les régions de culture dans le monde entier (Graham et Menge, 1999; 2000).

I.2.5. Symptômes de la gommose des agrumes

La gommose, encore appelée pourriture du collet des agrumes est l'infection la plus connue et la plus importante parmi la multitude des symptômes causées par les *Phytophthora* sur les agrumes (Graham et Menge, 2000; Graham et Feichtenberger, 2015). Elle engendre de sévères dégâts conduisant à la mort des arbres, et raccourcit de ce fait la durée de vie des vergers. Les symptômes sont visibles au niveau de la ligne de greffe, ou directement sur le collet des agrumes non greffés. L'écorce attaquée reste attachée à l'arbre avec des craquements par lesquels les exsudats de

gomme plus ou moins abondants coulent. Cette gomme disparaît après une pluie importante, mais persiste dans des conditions de sécheresse. Progressivement, les lésions se développent à la circonférence de l'arbre, s'étendent le long de la ligne de greffe, encerclent le collet et tuent l'arbre (Graham1 et Feichtenberger, 2015). Ceci représente une infection sévère des *Phytophthora* (Fig. 5).

Les portes greffes sensibles et les arbres non greffés attaqués montrent des lésions avec un écoulement abondant de gomme (Chaudhary et al., 2020). Le collet des plants et des jeunes arbres en champs peuvent être rapidement encerclés par la lésion et tués (Graham et Feichtenberger, 2015; Chaudhary et al., 2020). Les agrumes avec un collet ayant une grande circonférence peuvent également être tués ; mais généralement, le tronc est partiellement encerclé, et des dépérissements apparaissent sur le feuillage, ainsi qu'une croissance ralentie des pousses. Sur des portes greffes sensibles, les lésions peuvent apparaître dans le sol, en dessous de la ligne de greffe, et les symptômes apparaissent sur le feuillage, sans qu'ils ne soient visibles sur le tronc ou sur le collet (Timmer et al., 2004; Alvarez et al., 2008).

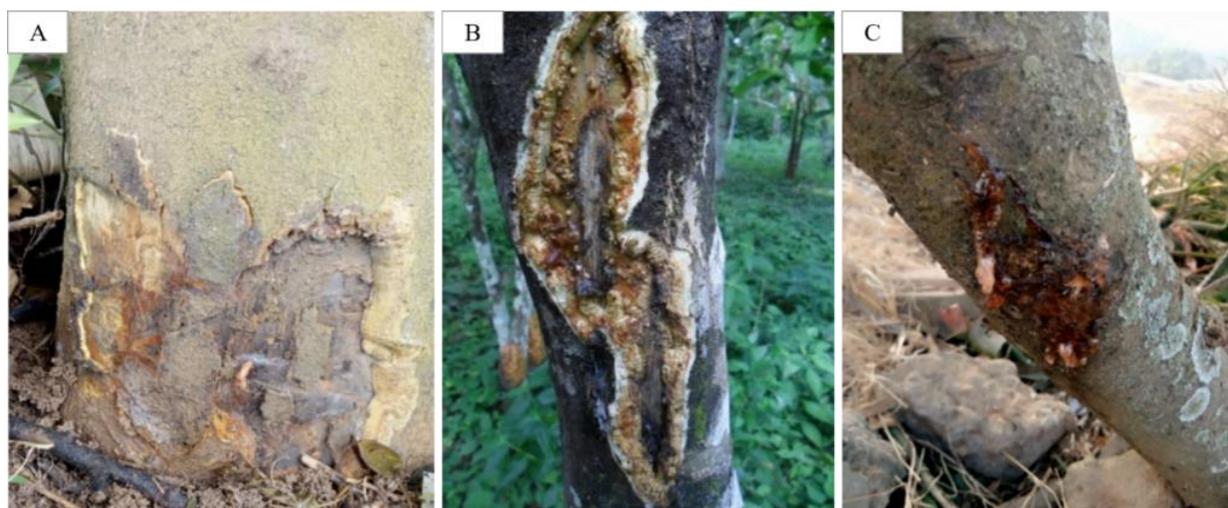


Fig. 5. Symptômes de la gommose sur les agrumes

(A) Attaque aggravée sur pied d'oranger, (B) lésion avec écoulement de gomme sur tronc d'oranger et (C) lésion sur branche de mandarinier.

I.2.6. Cycle épidémiologique de la gommose : cas de *Phytophthora parasitica*

Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années dans la mise en évidence de la diversité, l'évolution et les modes de vie des oomycètes phytopathogènes ; ainsi que dans la compréhension des bases génétiques et moléculaires des interactions oomycètes-plantes. Le cycle de vie de *P. parasitica* est représenté sur la figure 6. *P. parasitica* est un agent pathogène du sol avec une large gamme de plantes hôtes et représentatif de la plupart des espèces du genre *Phytophthora* (Meng et al., 2014). Le cycle de vie typique des *Phytophthora* comprend des phases

asexuées et sexuées. Les hyphes sont hyalins et aseptiques, avec parfois des renflements des hyphes. *P. parasitica* produit des sporanges asexués, des zoospores et des chlamydozoozoides. Les sporanges sont difficiles à libérer des hyphes, ce qui est différent des sporanges libérés et aéroportés de *P. infestans*. Les zoospores sont produites par les sporocystes et sont des cellules sans paroi avec deux flagelles, ce qui leur permet de nager. Les chlamydozoozoides sont des spores asexuées à parois épaisses, multinucléées, généralement produites à l'extrémité ou au milieu des hyphes. *P. parasitica* est principalement hétérothallique, nécessitant les types d'accouplement A1 et A2 pour la production d'oospores (Zhang *et al.*, 2019).

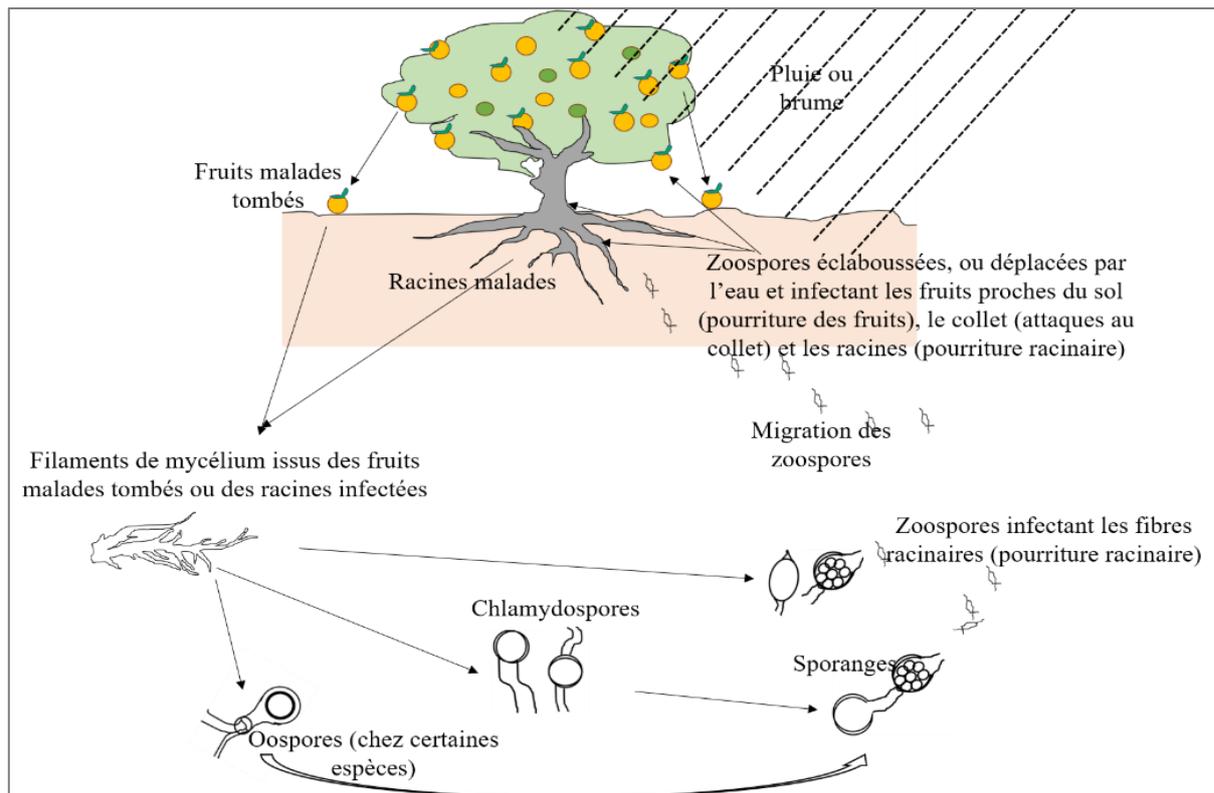


Fig. 6. Cycle épidémiologique de *Phytophthora parasitica* sur agrumes.

(Meng *et al.*, 2014)

Une production et une dispersion efficaces des spores sont essentielles pour une infection réussie (Latijnhouwers *et al.*, 2003). Les zoospores sont considérées comme les principaux agents infectieux à l'origine des maladies des plantes pour la plupart des espèces de *Phytophthora*. Une fois qu'elles ont atteint la surface de la plante, les zoospores se transforment en kystes immobiles, puis germent. *P. parasitica* infecte les racines et les feuilles en produisant une structure spécialisée, l'appressorium, formée à l'extrémité des tubes germinatifs (Kebdani *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011). Ensuite, des hyphes invasifs se développent et des structures de type haustoria se forment. Enfin, d'abondants sporanges se forment à la surface des plantes infectées. Si les conditions

environnementales sont défavorables, des chlamydo-spores sont produites à partir des hyphes (Meng *et al.*, 2014).

Les chlamydo-spores peuvent survivre dans le sol pendant plusieurs années et servir d'inoculum primaire dans le champ (van Jaarsveld *et al.*, 2002). La reproduction sexuée est un moyen efficace et important pour l'agent pathogène, lui permettant de produire une variation génétique, y compris un grand nombre potentiel de génotypes et de patho-types différents lui permettant de s'adapter à des conditions défavorables. Cependant, on ne sait toujours pas dans quelle mesure la reproduction sexuée joue un rôle dans le cas de *P. parasitica* (Meng *et al.*, 2014).

I.2.7. Moyen de dispersion de l'inoculum et condition d'infection des *Phytophthora*

Les chlamydo-spores et les oospores sont des structures de conservation des *Phytophthora*, qui leur permettent de survivre en cas de conditions défavorables. Les chlamydo-spores se développent dans des conditions de fraîcheur et de sécheresse avec une humidité du sol limitée, une aération du sol pauvre, une forte concentration en CO₂ et une insuffisance en croissance racinaire active (Virk et Nagpal, 2012). En effet, les *Phytophthora* telluriques sont prioritairement parasites et très peu saprophytes. Sous des conditions d'humidité et de températures favorables, les racines infectées produisent des sporanges qui à leur tour libèrent des zoospores mobiles. Au contact des racines, les zoospores enkystées germent et infectent la zone d'élongation racinaire (Duniway, 1983). Une fois que ces structures ont pénétré la racine, l'infection avance vers le cortex, induisant la pourriture de la radicelle. Le cycle peut ainsi se répéter aussi longtemps que les conditions sont favorables et les tissus sensibles disponibles.

En champ, la dissémination des *Phytophthora* est prioritairement assurée par l'usage de matériel végétal infecté (Graham et Timmer, 1994). Cependant, des moyens de dispersion mécaniques des *Phytophthora* ont été illustrés. On rencontre ainsi des cas de transmission au contact d'une racine infectée à une racine saine suite à leurs zones de croissance respectives. L'inoculum peut également se disséminer par les eaux de ruissèlement. Des éclaboussures peuvent favoriser la dissémination de l'inoculum du sol vers les parties aériennes de la plante. On note également une dispersion aérienne suite à la sporulation des lésions sur feuilles, tiges, fruits ou autres parties du végétal. L'activité humaine et celle des invertébrés par les mouvements du sol, de la plante et des propagules peuvent également favoriser la dissémination des *Phytophthora* (Ristaino et Gumpertz, 2000).

Les facteurs environnementaux peuvent également jouer un rôle critique sur le développement, la sévérité, la dispersion et la conservation de l'inoculum dans l'épidémiologie de la gommose à *Phytophthora* (Granke et Hausbeck, 2010). L'augmentation de la température, favorise

l'accroissement de la population des espèces telles que *P. parasitica* et *P. palmivora*, tandis qu'elle entraîne la diminution de la population de *P. citrophthora*. Les climats chauds et secs sont favorables à *P. parasitica*. La température seuil de *P. parasitica* est de 33° C. Une augmentation au quintuple de la mobilité des zoospores de *P. citrophthora* a été observée lorsque l'on passe de 24° C à 30° C (Matheron et al., 1998).

I.2.8. Méthodes de gestion de la gommose des agrumes

La gestion des maladies à *Phytophthora* implique généralement l'utilisation d'une série de stratégies nécessitant des interventions spécifiques sur la plante hôte, le sol, et l'agent pathogène (Gade et Lad, 2019).

I.2.8.1. Importance des porte-greffes dans la lutte contre la gommose

L'un des principaux facteurs dont dépendent l'incidence, la sévérité et la propagation de la gommose est donné par le degré de sensibilité du porte-greffe. La résistance aux attaques dues aux *Phytophthora* est donc l'une des caractéristiques primordiales à prendre en compte lors de la sélection d'un porte-greffe (Cacciola et Lio, 2008). Bien que l'utilisation de plants résistants soit l'un des meilleurs moyens et les plus pratiques pour lutter contre la gommose, certains porte-greffes résistants aux *Phytophthora* sont sensibles à d'autres maladies ou sont insatisfaisants sur le plan horticole (Ferguson et Haviland, 2016).

Les porte-greffes résistants aux infections par *P. citrophthora* sont également résistants à *P. nicotianae* (Graham et Timmer, 2006). Il est toutefois recommandé d'éloigner suffisamment le greffon du sol (au-dessus ou au moins 40 cm) pour empêcher l'inoculum de *Phytophthora* présent dans le sol d'atteindre le scion par éclaboussures d'eau (Dwiastuti, 2020). Par ailleurs, du fait de la sensibilité de la plupart des espèces et cultivars d'agrumes utilisés comme greffon aux infections de *Phytophthora*, le greffage peut réduire la résistance des porte-greffes (Bowman et Joubert, 2020; Rodrigues da Silva et al., 2021).

I.2.8.2. Pratiques culturales

Diverses pratiques culturales telles que la taille du feuillage peuvent agir considérablement sur le maintien de l'inoculum sur les arbres. En effet, la taille de l'arbre modifie son architecture et peut avoir un effet sur la propagation de la gommose. Par exemple, la suppression ou la diminution des branches inférieures peut créer un habitat défavorable aux infections de la gommose et réduire le risque d'infections de pourriture brune des fruits. La taille ou le surfaçage drastique des plantes présentant des symptômes de dépérissement dus à la pourriture des pieds ou des racines réduit le volume de la canopée et empêche l'arbre de s'effondrer (Cacciola et Lio, 2008).

La saturation en eau est l'un des principaux facteurs de prédisposition aux infections à *Phytophthora*. Les jeunes agrumes doivent être plantés à la même profondeur que dans la pépinière pour éviter d'enterrer le collet (Rajput et al., 2020). Une partie fondamentale du cycle de vie de *P. citrophthora* et *P. nicotianae* se déroule dans l'eau. Les méthodes d'irrigation qui mouillent le tronc favorisent donc les infections par les *Phytophthora*. Lorsque l'on utilise l'une de ces méthodes, il est préférable d'irriguer pendant la journée et pendant de courtes périodes, afin de permettre à l'eau de s'évaporer et de réduire la durée pendant laquelle l'écorce reste humide (Kaur et al., 2021).

L'enlèvement de la terre autour du collet crée des conditions défavorables aux infections des *Phytophthora*. Cette pratique protège l'écorce au pied du tronc contre l'humidité du sol, et aide les chancres à guérir. À l'inverse, le développement des mauvaises herbes autour du collet crée un habitat favorable aux *Phytophthora*, car il empêche le séchage rapide de l'écorce. L'utilisation d'herbicides est un moyen d'éliminer ce problème et facilite les inspections périodiques visant à détecter la gommose et son traitement. De plus, l'utilisation d'herbicides sur la rangée réduit le risque de blessures sur le tronc, qui constituent des points d'entrée pour l'infection. Les lésions, avant de cicatriser, sont sujettes aux infections pendant environ deux semaines (Graham et Timmer, 2006).

I.2.8.3. Lutte chimique

La lutte chimique est une pratique répandue. Des fongicides systémiques efficaces comme le métalaxyl et l'éthyl-phosphyte d'Aluminium (ou fosétyl-Al) permettent de lutter contre la gommose (Patel et Patel, 2020; Sawake et al., 2022). Un autre dérivé de l'acide phosphoreux, le phosphonate de potassium, agit de la même manière que le fosétyl-Al (Hao et al., 2019). Dans l'ensemble, ces fongicides sont efficaces à la fois contre *P. citrophthora* et *P. nicotianae*. Cependant, il existe de légères différences dans leur champ d'action. Le fosétyl-Al est légèrement plus efficace contre *P. citrophthora*, tandis que le méfénoxam est plus efficace contre *P. nicotianae*. L'inhibition du chancre sur les rameaux du scion et sur la partie basale de la tige du porte-greffe n'a été significative que sur les arbres traités 24 heures avant l'inoculation. Comme le fosétyl-Al et le méfénoxam, les nouveaux fongicides ont montré une activité préventive de longue durée (Cacciola et Lio, 2008).

Par ailleurs, de nouveaux fongicides efficaces ont été identifiés pour traiter la gommose des agrumes et prévenir le développement de la résistance aux fongicides phénylamide et phosphonate. Des nouveaux composés sont récemment devenus disponibles pour être évalués sur les agrumes, chacun ayant un mode d'action unique qui diffère des fongicides pour agrumes actuellement sur le marché (Hao et al., 2019). Le thiazole carboxamide (code FRAC 22) inhibe la mitose et la division

cellulaire. Le benzamide fluopicolide (code FRAC 43) déstabilise la formation de la membrane plasmique en délocalisant une protéine de type spectrine, l'amide d'acide carboxylique (code FRAC 40) cible la synthèse de la cellulose (Gray *et al.*, 2018).

Cependant, comme les *Phytophthora* peuvent survivre dans le sol pendant de longues périodes dans les débris de la plante hôte, la matière organique du sol, les organismes vivant en liberté ; ou alors peuvent former des structures résistantes comme les micro-sclérotés, les sclérotés, les chlamydospores ou les oospores, leur gestion devient très problématique. Par ailleurs, le coût élevé des méthodes de lutte, le développement de résistance aux intrants chimiques, l'émergence de nouvelles maladies et les préoccupations croissantes concernant la santé de l'environnement et des sols rendent aussi ces méthodes peu problématiques (Panth *et al.*, 2020). De plus, la plupart de ces techniques sont inadaptées au contexte socioculturel, aux systèmes de production, et même au contexte technologique des petits producteurs des régions intertropicales. Il est donc impératif de développer des protocoles de lutte ciblée, en tenant compte du contexte socio-écologique local et des systèmes de production existants au Cameroun.

I.2.8.4. Utilisation d'agents de lutte biologique contre les bioagresseurs des plantes

I.2.8.4.1. Implications des espèces du genre *Trichoderma* dans la lutte biologique contre les *Phytophthora*

La lutte biologique est une méthode qui consiste à utiliser des organismes antagonistes pour prévenir ou réduire les pertes infligées par les agents pathogènes. Il s'agit d'utiliser des microorganismes capables d'entrer en compétition, par l'antibiose ou le parasitisme avec les bioagresseurs, sans toutefois être néfaste pour la plante et son biotope. Ces antagonistes naturels sont réunis sous le concept de biopesticides. L'application des biopesticides repose sur la régulation des bioagresseurs plutôt que sur leur éradication (García-Latorre *et al.*, 2022; Tariq *et al.*, 2020; Zapata-Sarmiento *et al.*, 2020). Plusieurs microorganismes sont ainsi utilisés dans la gestion des pathologies végétales (Sharma et Gothwal, 2017). Parmi ces microorganismes, le genre *Trichoderma* forme un important groupe d'antagonistes.

Les *Trichoderma* sont des champignons cosmopolites à développement rapide secrétant des enzymes et des substances bioactives, qui font d'eux de potentiels antagonistes vis-à-vis d'autres champignons (Sharma et Gothwal, 2017). Les interactions antagoniste/agent pathogène incluent des mécanismes allant de l'antibiose à la promotion de phytohormones chez la plante hôte (Degani et Dor, 2021). En effet, les *Trichoderma* appliqués sur des plantes comme traitement peuvent moduler l'équilibre hormonal et induire la sécrétion de phytoalexines (Andrade-Hoyos *et al.*,

2020). Ils sont pour la plupart telluriques car 1-10 % des isolats du sol renfermeraient des souches de *Trichoderma* à potentiel antagoniste *in vitro* (Sharma et Gothwal, 2017 ; Degani et Dor, 2021). Les espèces du genre *Trichoderma* ont été signalées comme potentiel agent de biocontrôle des *Phytophthora* sur diverses plantes (Pakora et al., 2018; Sanchez et al., 2019). C'est le cas de *T. atroviride* et *T. asperellum* utilisé comme agents de biocontrôle contre la pourriture racinaire de la tomate causée par *P. nicotianae* (Spada et al., 2020). Sur cacaoyer, l'utilisation des espèces de *Trichoderma* pour lutter contre *P. megakarya* a été largement étudiée (Mbarga et al., 2014; Tchameni et al., 2011). Tondje et al. (2007) ont ainsi démontré une réduction de l'agressivité de *P. megakarya* par l'usage de *T. asperellum* souche PR11 comme agent de lutte biologique. De même *T. asperellum* s'est révélé efficace contre *P. cinnamomi* agent causal de la pourriture racinaire dans les vergers d'avocatier (*Persea americana*). Andrade-Hoyos et al. (2020) ont de ce fait signalé une inhibition de 78,32 % de la croissance mycélienne de *P. cinnamomi in vitro* par *T. asperellum* (T-AS2) suivie d'une régression de 50 % de l'indice de mortalité en pépinière après inoculation.

I.2.8.4.2. Synthèse des nanoparticules par voie de la chimie verte

Actuellement, la chimie verte connaît une croissance rapide et un impact mondial évident. Les nanoparticules isolées par cette voie ont de multiples applications dans un large éventail de domaines, notamment la catalyse, l'électronique, la médecine, la biomédecine et l'agriculture (Kumar et al., 2021). Dans le secteur agricole, les nanoparticules ont attiré une attention considérable et sont largement utilisées comme nano-fertilisants, nano-pesticides, transporteurs de pesticides conventionnels, et conservateurs alimentaires (Balaji et al., 2009; Ibrahim, 2019).

En outre, la production de nanoparticules via la méthode biosynthétique montre de grands avantages du fait de leur caractère écologique, leur faible coût, la simplicité du processus de synthèse, et leur haute performance par rapport aux méthodes de synthèse physique et chimique. Cette approche est basée sur des extraits de feuilles et est absolument exempte de produits chimiques dangereux. De plus, le mécanisme de bio-réduction de l'ion métallique en nanoparticules métalliques est assez rapide, facilement réalisable à température ambiante et facilement adaptable. Par conséquent, les feuilles d'espèces médicinales telles que *Thevetia peruviana* (Rupiasih et al., 2015), *Moringa oleifera* (Prasad et Elumalai, 2011), *Cymbopogon citratus* (Masurkar et al., 2011), *Artemisia absinthium* (Ali et al., 2015), ... et bien d'autres ont largement été utilisées pour la synthèse des nanoparticules.

Tithonia diversifolia est un arbuste vivace ou annuel envahissant traditionnellement utilisé pour traiter diverses maladies humaines, notamment le diabète, le paludisme, les morsures de serpent,

la rougeole, les ulcères gastriques, les douleurs menstruelles, les plaies... (Ajao et Moteetee, 2017; Ojo et al., 2018). Divers travaux ont démontré que *T. diversifolia* possède des propriétés antioxydantes, bactéricides, fongicides et insecticides (Dada et al., 2018; Ferreira Farias et al., 2019; Green et al., 2020). *T. diversifolia* a déjà été utilisé pour la synthèse des nanoparticules de nitrate d'argent dont l'activité a été testée sur différents types d'organismes (Gundo et al., 2021; Mabou et al., 2018). Cependant, aucune étude n'avait testé l'effet des nanoparticules de nitrate d'argent synthétisés à partir de *T. diversifolia* sur les espèces de *Phytophthora* isolées des agrumes. Pourtant, cela représente une opportunité sans précédent pour les petits producteurs d'agrumes.

I.2.9. Nécessité des procédés agroécologiques dans la gestion des bioagresseurs

L'agriculture conventionnelle, dite intensive a permis l'augmentation considérable de la production agricole, au travers de la révolution verte, depuis les années 1950 (Dawson et al., 2016). Cependant, le lourd bilan écologique qui en résulte discrédite ce modèle d'agriculture et le rend non durable (Tilman et al., 2002). En effet, les risques associés à l'utilisation de pesticides ont dépassé leurs effets bénéfiques (Mahmood et al., 2016). Les pesticides ont des effets drastiques sur les espèces non ciblées et affectent la biodiversité animale et végétale, les réseaux trophiques aquatiques et terrestres et les écosystèmes (Mahmood et al., 2016; Cai et al., 2021). Ainsi, bien que les pesticides chimiques, armes privilégiées de l'agriculture intensive, aient montré des avantages indéniables, leur utilisation devient de plus en plus préoccupante tant pour l'agriculture elle-même, que pour l'environnement et la santé humaine (Sharma et al., 2019; Hassaan et El Nembr, 2020). L'amélioration des systèmes de production vers de nouveaux modèles d'agriculture durable, favorisant le développement de moyens efficaces de luttés contre les bioagresseurs et respectueux de l'environnement devient une urgence (Dornbush et von Haden, 2017; Martin et al., 2019).

La stratégie agroécologique, qui consiste à s'appuyer sur les processus écologiques d'intérêt, au sein des agroécosystèmes, afin de maximiser la productivité et la durabilité, tout en réduisant le recours aux intrants chimiques est de plus en plus admise (Tassin, 2011). Les agrosystèmes représentent ainsi une voie privilégiée pour les systèmes agricoles résilients et futures (Alcon et al., 2020). En effet, s'inspirant des écosystèmes naturels, qui sont le fruit d'une adaptation des communautés animales et végétales à un environnement donné et donc à des contraintes biotiques et abiotiques précises, ces systèmes fournissent un modèle de durabilité et de résilience (Deheuvels et al., 2012). Parmi les caractéristiques des écosystèmes naturels, il est admis que la diversité spécifique joue un rôle clé dans la durabilité et la multifonctionnalité de ces écosystèmes (Malezieux et al., 2009). Ainsi, une augmentation de la diversité végétale des agroécosystèmes est supposée améliorer la fourniture de nombreux services écosystémiques à l'instar de la régulation

des bioagresseurs (Garbach et *al.*, 2014; Ratnadass et *al.*, 2012). Par ailleurs, cette régulation des bioagresseurs au sein des agroforêts telles que les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (SAFC) est généralement liée à leurs caractéristiques structurales.

I.3. Interactions bioagresseurs et structure des populations hôtes dans les systèmes agroforestiers tropicaux

I.3.1. Composition spécifique et structure des SAFC

Leakey (2017) définit l'agroforesterie comme étant un système de gestion des ressources naturelles, dynamique et écologique qui, par l'intégration des arbres dans les terres agricoles et de parcours, diversifie et soutient la production des petits exploitants pour des avantages socio-économiques et environnementaux accrus. Les agroforêts sont les agroécosystèmes les plus proches des écosystèmes naturels sur le plan structurel et fonctionnel (Schroth et Harvey, 2007). Diverses études ont décrit et caractérisé la structure des agroforêts à base de culture du sous-étage, tel que celui à base du cacaoyer ces dernières décennies (Deheuvels et *al.*, 2012; Gidoïn, 2013). Ces travaux ont montré que divers peuplements sont associés à la population de cacaoyers. Il s'agit notamment des arbres forestiers, des arbres fruitiers, des *Musaceae* et *Palmaceae* (Fig. 7).

Au sein des SAFC, le choix des systèmes, des espèces ainsi que leur répartition obéissent aux stratégies paysannes (Armengot et *al.*, 2020). Certains arbres présents y sont conservés ou plantés pour leurs potentialités socio-économiques et spirituelles ; d'autres pour leur capacité à réguler la fertilité des sols et ou à fournir de l'ombrage aux cacaoyers (Sonwa et *al.*, 2007). Dans les SAFC, le cacaoyer est la culture principale. Il est associé aux arbres forestiers et l'on retrouve également des arbres fruitiers. L'arbre fruitier communément introduit serait le safoutier (*Dacryodes edulis*), planté dans 83 % des cacaoyères (Schroth et Harvey, 2007). Les manguiers, les avocatiers, diverses espèces d'agrumes et d'autres fruitiers y sont présents. Ndo et *al.* (2019a) signalent que c'est dans ce système que se retrouvent principalement les agrumes au Cameroun. Dans plusieurs SAFC, outre les cultures pérennes, les cultures vivrières annuelles et/ou pluriannuelles sont présentes (Jagoret et *al.*, 2014). La biodiversité au sein des SAFC est certes loin d'atteindre celle des forêts naturelles, mais ceux-ci arrivent à maintenir une richesse écosystémique non négligeable puisque ce type de paysage influencé par l'homme tend à imiter les forêts naturelles (Ngo Bieng et *al.*, 2017, 2013).

Goreaud et Pelissier (2000) définissent la structure spatiale d'un peuplement végétal comme l'utilisation horizontale et verticale de l'espace par les individus du peuplement. La structure verticale prend en considération la hauteur des peuplements végétaux. Elle se caractérise par des attributs structuraux tels que la densité des individus et la stratification du peuplement végétal (Somarriba et Beer, 2011). La structure horizontale quant à elle prend en considération la

répartition horizontale des individus du peuplement végétal dans le plan. Elle se caractérise par différents motifs de répartition horizontale des individus à la surface de la parcelle tels que la structure spatiale régulière, aléatoire ou agrégée (Gidoïn et al., 2014).



Fig. 7. Structure verticale d'un système agroforestier à base de cacaoyer

I.3.2. Interactions plantes hôtes-bioagresseurs dans les agroforêts complexes

L'augmentation de la diversité végétale dans les agrosystèmes peut agir de deux manières sur les bioagresseurs. Pour le cas des maladies spécifiquement, lorsqu'elle entraîne une diminution de l'intensité d'attaque, on parle "d'effet de dilution". Par contre, lorsqu'elle entraîne une augmentation de l'intensité d'attaque de la maladie, on parle plutôt "d'effet d'amplification" (Keesing et al., 2006; Plath et al., 2012). L'effet de la structure du peuplement végétal sur les agents pathogènes est en fait, le résultat d'un ensemble de mécanismes variés, mais qui interagissent et dont les effets indépendants sont difficiles à délimiter (Ratnadass et al., 2012). Toutefois, Schroth et al. (2000) proposent théoriquement de distinguer l'effet biologique de l'effet physique, qui peuvent agir sur la culture principale et les plantes associées.

I.3.3. Mécanismes biophysiques liés à la régulation des bioagresseurs dans les systèmes agroforestiers

L'effet biophysique d'un végétal sur un agent pathogène dépend de l'interaction biotique qui les lie ; entre autres le neutralisme, la prédation, la symbiose, le mutualisme, l'amensalisme, le commensalisme, le parasitisme, etc.... Cette interaction déterminera ainsi l'augmentation, la diminution ou encore la non influence du végétal sur la présence de l'agent pathogène. L'effet biologique dépend donc de la composition végétale du système de culture, c'est-à-dire de la nature des espèces végétales, et du bioagresseur étudié. Trois principaux mécanismes illustrent les liens

entre la composition végétale et l'action des bioagresseurs *via* des variations de ressource. Il s'agit du mécanisme de diminution de la ressource du bioagresseur, de l'introduction de la ressource pour le bioagresseur et l'introduction d'une ressource pour un ennemi naturel ou un vecteur du bioagresseur.

I.3.3.1. Mécanisme de diminution de la ressource du bioagresseur

Les études sur le mécanisme de diminution de la ressource du bioagresseur montrent que la baisse de l'abondance relative ou de la densité en plantes hôtes *via* l'augmentation de la richesse spécifique végétale expliquent davantage les différences d'intensité d'attaque des bioagresseurs que la richesse spécifique du mélange en soi (Sood et Mitchell, 2009). Keesing et *al.* (2006) proposent cinq mécanismes pour expliquer la réduction de l'intensité de maladie par l'augmentation de la diversité végétale. Premièrement, les mécanismes indépendants de la densité en hôtes, qui peuvent être : la réduction de la probabilité de rencontre, la réduction de la probabilité de transmission par rencontre et l'augmentation du taux de guérison. Deuxièmement, les mécanismes dépendants de la densité en hôtes, qui sont : la régulation de la densité en hôtes sensibles et l'augmentation de la mortalité des hôtes infectés. Au sein des systèmes agroforestiers, cet effet de dilution de la ressource du bioagresseur est mis en exergue par la gestion du microclimat (Schroth et *al.*, 2000).

I.3.3.2. Introduction de la ressource pour le bioagresseur

La forte biodiversité des agrosystèmes entraîne une augmentation probable d'hôtes alternatifs pour le bioagresseur d'un hôte donné (Ratnadass et *al.*, 2012). Ceci a pour conséquence de contribuer à l'augmentation du potentiel de développement du bioagresseur dans l'agroécosystème en mettant à sa disposition de nouvelles ressources. Cette hypothèse concerne davantage les agents pathogènes généralistes, qui utilisent différentes espèces végétales comme ressource (Gidoin, 2013). L'équilibre entre l'effet de réduction de l'hôte habituelle d'un agent pathogène dans l'agroécosystème étudié et l'introduction d'une ressource alternative est souvent difficile à estimer pour les bioagresseurs généralistes. Cet équilibre dépendra tout de même, en partie, de la différence de sensibilité entre les espèces végétales et les principaux hôtes du bioagresseur. Ainsi, si l'hôte alternatif introduit est moins sensible que ce dernier, la diminution de la ressource la plus sensible peut l'emporter sur l'introduction d'une nouvelle ressource et l'effet net sera une diminution de l'intensité d'attaque du bioagresseur (Kachhawa, 2020; Zhang et *al.*, 2020).

A titre d'exemple, plusieurs espèces appartenant à la même famille que le cacaoyer (*Malvaceae*) sont connues comme étant des hôtes alternatifs des mirides du cacaoyer du genre *Sahlbergella* ; et sont donc déconseillées pour la fourniture d'ombrage au sein des cacaoyères (Babin et *al.*, 2011). Aussi, dans le cas particulier des *Phytophthora*, plusieurs espèces de ce genre attaquent diverses

espèces forestières (*Cola nitida*, *Dracaena mannii*, *Funtumia elastica*, *Irvingia sp.*, *Ricinodendron heudelotii*, *Sterculia tragacantha*, ...) et fruitières (*Persea americana*, *Citrus spp.*, ...) qui sont fortement présentes dans les SAFC (Widmer et Hebbar, 2013; Sumida et al., 2020). Cette forte présence d'hôtes alternatifs potentiels pourrait donc, soit augmenter, soit diminuer IG sur agrumes.

I.3.3.3. Introduction d'une ressource pour un ennemi naturel ou un vecteur du bioagresseur

Au sein des agroécosystèmes l'augmentation de la biodiversité peut également augmenter la probabilité d'introduire une plante qui est une ressource, soit pour les ennemis naturels d'un agent pathogène, soit au contraire, pour son vecteur (Schroth et al., 2000). Ce type de mécanisme d'introduction de ressource peut impliquer des espèces dont la présence est indispensable, ou améliore le cycle de vie des bioagresseurs des cultures. Une augmentation de la diversité végétale augmente la probabilité d'introduire une ressource pour les bioagresseurs, leurs ennemis naturels et/ou leurs vecteurs (Keesing et al., 2010). Cependant, l'augmentation de la diversité végétale est également susceptible de modifier le microclimat qui affectera la présence de ces trois types d'organismes vivants dans les agroécosystèmes.

I.3.4. Effet de l'ombrage sur les agents pathogènes

L'ombrage désigne l'ensemble des modifications microclimatiques qui se produisent dans le sous-étage en raison de l'introduction de la diversité végétale dans un agroécosystème (Tschardt et al., 2011; Gidoïn, 2013). La présence d'arbres associés à une culture atténue la température de l'air et du sol, réduit la vitesse du vent ainsi que la quantité et la qualité de la lumière transmise. Cela augmente également l'humidité relative de l'air et l'humidité du sol dans le sous-étage (Ratnadass et al., 2012; Tschardt et al., 2011). L'effet de l'ombrage sur les ravageurs est controversé (Schroth et al., 2000). Si l'ombrage dense favorise la propagation de certains agents pathogènes, l'ombrage léger ou l'absence d'intensité d'ombrage peut limiter le développement d'autres agents pathogènes (Ndo & Akoutou, 2021). Plusieurs études ont montré l'implication de l'ombrage sur le développement et la propagation de divers agents pathogènes (Andres et al., 2018; Durand-Bessart et al., 2020). Les effets de l'ombrage ont été documentés ; et il a été démontré que la lumière, notamment les ultraviolets, stimulent la sporulation de nombreuses espèces fongiques. En outre, le microclimat peut influencer indirectement l'agent pathogène par son impact sur la plante hôte (Pumariño et al., 2015; Ngo Bieng et al., 2017).

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

Ce deuxième chapitre présente le matériel et les méthodes utilisés dans le cadre des activités qui ont conduit l'obtention des résultats de l'étude. Dans la Section II.1., dédiée au Matériel, la zone d'étude et les différents types de matériel utilisés sont présentés. Dans la Section II.2., les Méthodologies utilisées sont présentées, notamment, les dispositifs expérimentaux, les méthodes de collecte des échantillons et des données, les outils informatiques ainsi que les différentes techniques d'analyse des données obtenues.

II.1. Matériel

II.1.1. Zone et sites d'étude

L'étude a été conduite dans la zone de forêt humide du Cameroun qui comporte deux zones agroécologiques (Fig. 8) :

- la zone de forêt humide à pluviométrie monomodale (ZFHPM) (latitude 2° 6' à 6 °12' N, longitude 8°48' à 10°30' E, altitude : 200-800 m). C'est une zone très humide et chaude, avec des températures moyennes annuelles allant de 22 à 29° C et une humidité relative comprise entre 85 et 95 %. La pluviométrie moyenne annuelle s'étale entre 2 500 et 4 000 mm, voir même 11 000 mm dans certaines localités. Elle est caractérisée par une saison sèche de 3 mois (décembre à février) et une saison de pluie de 9 mois (mars à novembre). Les sites de Muyuka, Njombé et Makondo ont été choisis dans cette zone. Lesdits sites sont respectivement localisés dans les Régions administratives du Sud-Ouest et du Littoral ;
- la zone de forêt humide à pluviométrie bimodale (ZFHPB) (latitude 2° 6' à 4° 54'/5° 48' N, longitude 10° 30' à 16° 12' E, altitude : 500-1000 m). Le climat dans cette zone est chaud et humide avec des températures de l'ordre de 25 °C et une humidité relative moyenne de 75 %. La pluviométrie est répartie en deux saisons de pluie, dont la première s'étend de mars à juin ; et la seconde de septembre à novembre. Les sites d'étude ont été établis à Kédia, Bokito, Goura, Evodoula, Bikok et Boumnyebel. Tous ces sites sont localisés dans la Région administrative du Centre.

Les sites d'étude ont été choisis dans les grands bassins de production d'agrumes qui approvisionnent les deux grandes villes du pays et d'autres Etats de la Sous-région (Temple, 2001). Le site dans cette étude représente un espace géographique ayant des conditions climatiques et édaphiques assez homogènes et de ce fait pouvant garantir une production homogène.

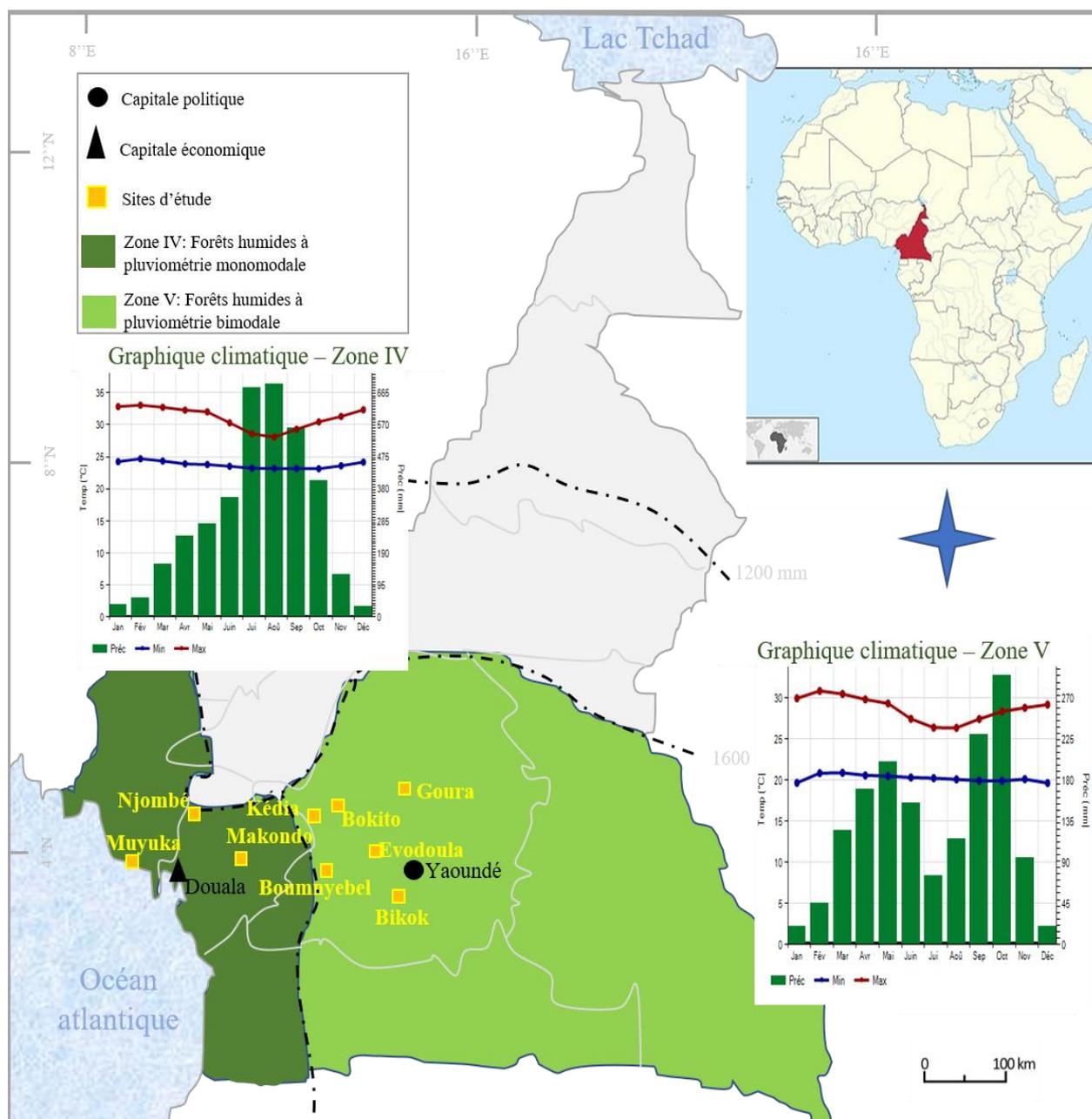


Fig. 8. Localisation des sites d'étude.

II.1.2. Matériel utilisé

II.1.2.1. Matériel de collecte des données de terrain

Le matériel de terrain était principalement constitué de :

- théodolite de marque Leica TCR 703 et une lentille d'observation qui ont servi à faire des levés topographiques et la cartographie des parcelles agroforestières ;
- GPS (*Global Positioning System*) de marque Garmin GPS MAP 64, qui a servi à géo-référencer les arbres observés et les parcelles ;
- appareil photo de marque BENQ qui a servi pour les prises photographiques ;

- décamètres, qui ont servi à délimiter et à cartographier les parcelles ;
- ficelles qui ont servi à la délimitation, la cartographie et l'accrochage des étiquettes sur les arbres échantillonnés ;
- machettes qui ont servi pour frayer les chemins et autres services en forêt ;
- peinture et des pinceaux qui ont servi à marquer les limites des parcelles expérimentales ;
- fiches de terrain et des blocs-notes sur lesquelles les données étaient notées ;
- petit matériel de bureautique (gommes, crayons, taille-crayons, marqueurs) qui a servi à la prise des données sur le terrain ;
- étiquettes qui ont permis de numérotter les agrumes observés.

II.1.2.2. Matériel de laboratoire

Le matériel utilisé au Laboratoire était principalement composé des :

- équipements de laboratoire (autoclave, hotte à flux laminaire, étuve, ...) qui ont servi à la culture et l'isolement des micro-organismes ;
- consommables de laboratoire qui ont servi à la culture et l'isolement des *Phytophthora* (des boîtes de Pétri, des milieux de culture (Agar, PDA, V8), des antibiotiques (Pimaricine, Ampicilline, Rifampicine), une trousse à outils, et de l'alcool à 95°) ;
- fruits de pommier (*Malus domestica*) et des cabosses de cacao (*Theobroma cacao*) qui ont servi au piégeage des *Phytophthora* et autres manipulation.

II.2. Méthodes

II.2.1. Description de la situation épidémiologique de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun

II.2.1.1. Dispositif expérimental et description des peuplements à base d'agrumes

Les agrumes ont été observés dans des jardins de case, les vergers purs ou système de culture intensif, les vergers associés à d'autres fruitiers, les vergers associés aux cultures annuelles, et les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers. Les agrumes observés ont été choisis aléatoirement et selon la disponibilité des systèmes de production dans les sites d'étude (Tab. II). Au total, 1521 agrumes ont été observés dans les neuf sites, répartis dans les cinq systèmes de productions.

Tab. II. Dispositif expérimental de base.

Zone agroécologique	Site	Système de production	Nombre d'agrumes observés	Nombre d'espèces d'agrumes	
Zone agroécologique à pluviométrie monomodale	Makondo	Vergers associés aux cultures annuelles	61	7	
		Vergers purs	132		
		Jardins de case	191		
		SAFC	23		
	Njombé	Vergers purs	80	7	
		Vf	172		
		Va	14		
		Jardins de case	75		
		SAFC	52		
Zone agroécologique à pluviométrie bimodale	Kédia	Vergers associés aux arbres fruitiers	55	5	
		Vergers associés aux cultures annuelles	104		
		Jardins de case	134		
		SAFC	133		
	Goura	Vergers purs	76	6	
		Vergers associés aux cultures annuelles	23		
		Jardins de case	115		
		SAFC	81		
	Total		5	1521	7

II.2.1.2. Quantification de la maladie

Sur chaque agrume, les lésions sur le collet (éventuellement avec écoulement de gomme) étaient recherchées. Lorsqu'elles étaient présentes, leur étendue était mesurée relativement à la circonférence du collet de l'arbre, à l'aide d'un mètre ruban (Fig. 9). Ces données ont été prises en trois sessions d'observation : la première de novembre 2019 à février 2020, la deuxième de juin à juillet 2020 et la dernière de décembre 2020 à janvier 2021. Pour ces trois sessions d'observation de la maladie, les moyennes ont été calculées pour chaque arbre.

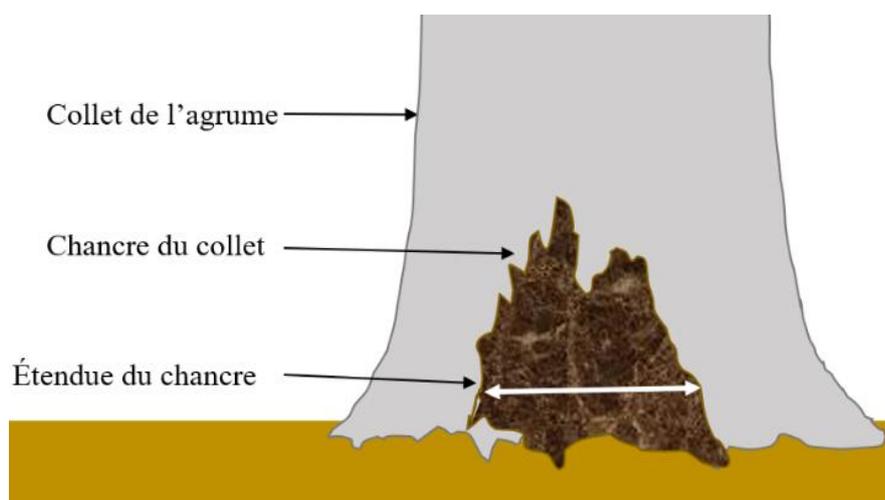


Fig.9. Illustration schématique de la quantification de l'étendue des chancre sur le collet des agrumes

II.2.1.3. Isolement des *Phytophthora*

II.2.1.3.1. Collecte des échantillons

La collecte d'échantillons a été faite pendant la saison sèche, entre le 15 novembre 2019 et le 27 février 2020. Cette période correspond à la phase avant l'entrée en production des agrumes et le début de l'épidémie. Après la délimitation des parcelles expérimentales, des échantillons mixtes, composés de sol, de racines et d'écorces ont été prélevés dans la rhizosphère directe des agrumes montrant des lésions de gommose. Le piégeage à partir d'échantillons de sol a été fait grâce aux pommes (*Malus domestica*), et les échantillons de racines et écorces ont été directement mis en culture. Les manipulations ont été faites au Laboratoire Centrale de Phytopathologie du Centre de Recherche Agricole de Mbalmayo de l'IRAD-Nkolbisson

II.2.1.3.2. Obtention des cultures pures de *Phytophthora* à partir d'échantillons de sol

Au laboratoire, les échantillons de sol préalablement prélevés, ont été mis en commun pour chaque système de production et pour chaque site, pour former un échantillon composite unique. L'échantillon composite obtenu a été tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm de mailles. Pour chaque échantillon, 6 g de sol tamisé ont été introduits dans des puits de 10 mm de largeur et de 15 mm de profondeur coupés dans une pomme (*Malus domestica*). Deux puits par fruit ont été réalisés selon la méthode de Hendrix et Campbell (Vanegas et al., 2022) et pour un total de trois fruits par échantillon. Par la suite les pommes ont été mises en incubation à une température de 20 °C pendant trois jours.

Au bout de trois jours, les infections ont été observées sur les pommes mises en incubation. Par la suite, des morceaux de tissus infectés ont été prélevés de manière aseptique sur le fond de

croissance et mis en culture sur PDA (Ingrédients : Gms/Litre Pommes de terre, infusion de 200 g/L, Dextrose 20g/L, Agar 15 g/L, pH final (à 24°C) 5.6±0.2) et préalablement préparé par chauffage. Le milieu de culture a été modifié avec 10 mg de Pimaricine, 200 mg d'Ampiciline, 25 mg de Rifampicine et 10 mg de Bénomyl (PDA-PARB). Les boîtes inoculées ont été placées dans l'obscurité à une température de 24 ° C et examinées 2 à 3 jours plus tard (Fig. 10).

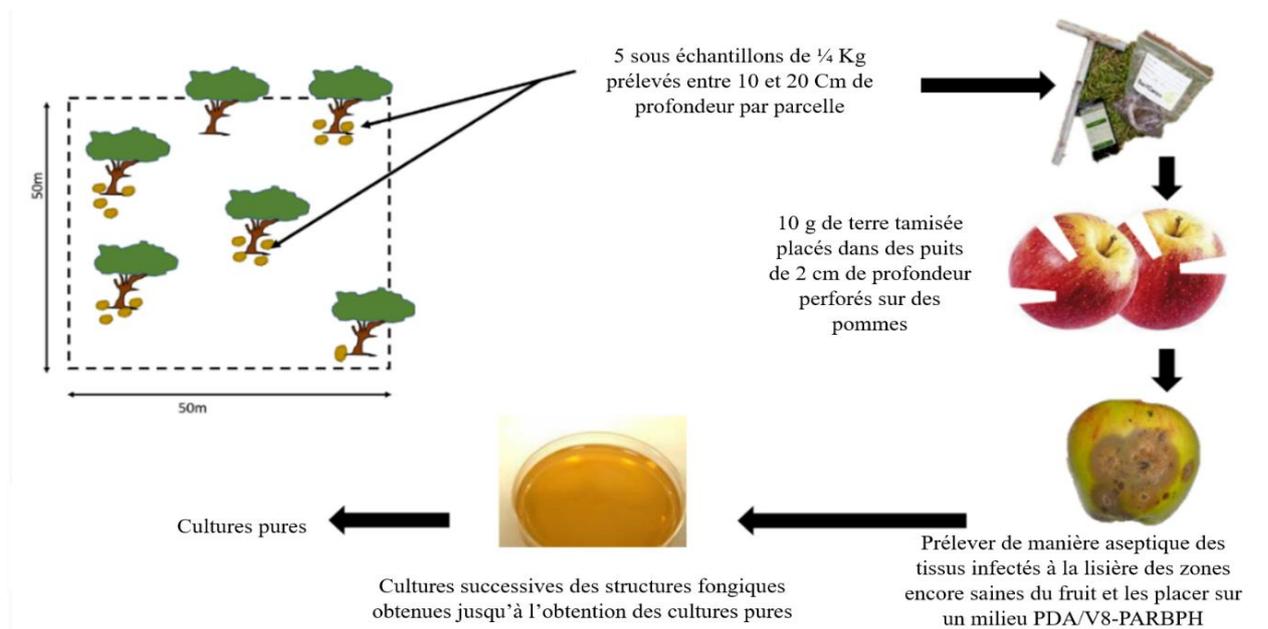


Fig. 10. Méthodologie de piégeage des *Phytophthora* à partir des échantillons de sol.

(Meitz-Hopkins et al., 2014 ; Vanegas et al., 2022)

II.2.1.3.3. Obtention d'isolats de *Phytophthora* à partir d'organes d'agrumes

Des échantillons d'écorce et de racines d'agrumes ont été prélevés au niveau des chancres sur les collets d'arbres malades. Ceux-ci ont été étiquetés et mis dans des sacs en papier brun et amenés au laboratoire. L'isolement des *Phytophthora* s'est fait suivant les étapes ci-après décrits par Mounde (2012), Meitz-Hopkins et al. (2014) et Barboza et al. (2020) : (i) les échantillons d'organes végétaux ont été lavés sous l'eau du robinet, stérilisés en surface dans de l'éthanol à 70 % pendant 5 à 10 minutes, puis rincés et séchés à l'aide du papier filtre ; (ii) des morceaux d'écorce d'environ 2 à 4 mm de largeur ont été découpés sur le bord des lésions et mis en culture sur le milieu PDA-PARB ; (iii) les boîtes inoculées ont été placées à l'obscurité à 24° C et examinées 2 à 3 jours plus tard et (iv) des cultures pures ont été obtenues en pratiquant des repiquages successifs des pointes d'hyphes sur milieu CMA (gélose à la farine de maïs) modifiée.

L'identification microscopique a été réalisée après culture des isolats sur les milieux CMA, PDA et V8. Les fragments de thalles mycéliens de 5 mm de diamètre ont été prélevés au niveau du front

de croissance des cultures pures de *Phytophthora* de 5 jours. Après incubation, les cultures ont été soumises à une alternance photopériodique de 12 heures et à une température de 25 °C.

II.2.1.4. Identification morphologique des *Phytophthora*

Une fois les souches pures obtenues, l'identification s'est faite sur la base des caractères macroscopiques et microscopiques. L'identification macroscopique s'est faite à l'œil nu en se basant principalement sur la couleur des colonies, l'aspect du mycélium aérien et sa pigmentation. L'absence ou la présence des motifs (pétaloïde, en étoile, en rosette) a aussi été observée.

Pour ce qui est de l'identification microscopique, un fragment de thalle d'une souche pure de chaque isolat a été prélevé à l'aide d'une aiguille lancéolée et déposé sur une lame. Une goutte d'eau distillée stérile y a été ajoutée, le tout recouvert par une lamelle. La préparation ainsi faite, a été montée sur microscope optique à lumière composée de marque Perflex Sciences. Les observations microscopiques ont porté sur les critères morphologiques de classification des *Phytophthora* arboré par Waterhouse (1963); Stamps et *al.*, (1990); et Gallegly et Chuan Xue (2008). Il s'agit de : (i) la morphologie des sporocystes et chlamydospores (forme, longueur, largeur, rapport longueur/largeur (L/l)) et de (ii) la disposition des sporanges et chlamydospores et la longueur du pédicelle.

Pour observer ces structures, 20 sporanges et 10 chlamydospores choisis de façon aléatoire ont été mesurés pour chaque isolat aux grossissements différentiels $\times 10$, $\times 40$ et $\times 100$. Le rapport longueur/largeur a été calculé pour chaque isolat tel que proposé par Duan et *al.*, (2008). Les clés tabulée de Brazier (1998) et dichotomique de Gallegly et ChuanXue (2008) ont été utilisées pour déterminer le plus probablement possible les espèces.

II.2.1.5. Caractérisation des *Phytophthora*

II.2.1.5.1. Evaluation de la croissance radiale

Les taux de croissance quotidien et la vitesse moyenne de croissance de chaque isolat de *Phytophthora* ont été évalués sur les milieux de culture PDA-PARB et V8-PARB, à des températures de 24 et 35 °C pendant 7 jours à l'obscurité. Des disques mycéliens de 5 mm de diamètre ont été transférés au centre des boîtes de Pétri contenant du PDA-PARB ou V8-PARB puis, ils ont été incubés comme décrit dans le paragraphe II.2.1.3.3. Des mesures quotidiennes du diamètre mycélien ont été prises à l'angle droit, le long des deux axes tracés perpendiculairement au verso de chaque boîte de Pétri.

La moyenne de ces deux mesures soustraites du diamètre de l'explant représentait la mesure de la croissance du *Phytophthora* sp. Celle-ci dérive de la formule décrite par Puig et al. (2018) (Equation 1). Pour chaque isolat 3 répétitions ont été faites. Le calcul a été fait selon l'équation 1 ci-après.

$$L = \left(\frac{D1+D2}{2} \right) - D0 \text{ (Équation 1)}$$

Avec : D0 : diamètre de l'explant ; D1 et D2 : diamètres de culture mesurés dans les deux directions perpendiculaires.

II.2.1.6. Répartition géographique des *Phytophthora* spp. dans les zones agroécologiques

La distribution géographique des espèces de *Phytophthora* dans les sites s'est faite en enregistrant le nombre d'isolats obtenus dans chaque site. La prévalence de chaque espèce a été déterminée en exprimant le nombre d'isolats de chaque espèce collectés dans tous les sites, en pourcentage du nombre total d'isolats recueilli (Mounde, 2012).

II.2.2. Evaluation de l'effet des caractéristiques structurales des SAFC sur IG

II.2.2.1. Dispositif expérimental pour les SAFC

Le SAFC représente le principal système de production des agrumes au Cameroun (Aulong et al., 2000; Ndo, 2011). Dans le cadre de cette étude, des SAFC ont été choisis dans les sites de Muyuka, Bokito, Boumnyebel, Evodoula et Bikok. Ce choix est justifié par la disponibilité des SAFC dans ces localités. Dans chaque site, des parcelles élémentaires ayant au moins 12 agrumes (toutes espèces confondues), un nombre important d'arbres forestiers et des fruitiers autres que les agrumes ont été choisis de préférence. Ces parcelles se trouvent dans des villages plus ou moins éloignés de manière à être représentatifs de l'ensemble du site. Les parcelles choisies étaient distantes d'au moins trois kilomètres entre elles. Un réseau de 33 SAFC a ainsi été établi dans les 5 sites (Tab. III).

Tab. III. Répartition des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers étudiés

Site	Nombre de SAFC	Nombre d'agrumes observés
Muyuka	6	116
Bokito	8	342
Boumnyebel	5	85
Bikok	7	120
Evodoula	7	105
Total	33	768

II.2.2.2. Cartographie des parcelles agroforestières

L'étude de la structure horizontale des peuplements à base d'agrumes dans les SAFC avait pour but d'identifier l'effet des caractéristiques structurales desdits systèmes sur le fonctionnement de l'agroécosystème. La cartographie des SAFC consiste en effet à l'acquisition des données spatiales et structurelles des différents individus qui composent le peuplement végétal afin d'analyser les interactions qui s'y déroulent. La cartographie des unités expérimentales échantillonnées requiert cependant l'acquisition des données spatiales explicites, indiquant les coordonnées cartésiennes (x, y) de toutes les plantes pérennes, ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ≥ 10 cm.

La cartographie a été réalisée à l'aide d'une Station Totale Leica TCR 703. Cette méthode a été pratiquée par Gidoïn (2013). Pour cartographier une cacaoyère, le point le plus haut de la parcelle, ou à défaut, le point de la parcelle à partir duquel un maximum d'individus (plantes) peut être observé était recherché. Une fois ce point ciblé, une première station (S1) était implantée. Ceci se faisait par la mise à niveau de la Station Totale. Par la suite, un premier point visé (P1) était ciblé à 50 m. Les coordonnées GPS de S1 et P1 (Longitude, Latitude et Altitude) étaient notées ainsi que les coordonnées triangulaires de P1 (Hz : qui représente l'angle d'inclinaison par rapport à la ligne de base : ici 0 ; et D : la distance horizontale entre S1 et P1. La figure 11 ci-dessous présente schématiquement la méthodologie adoptée pour la cartographie des CBAS.

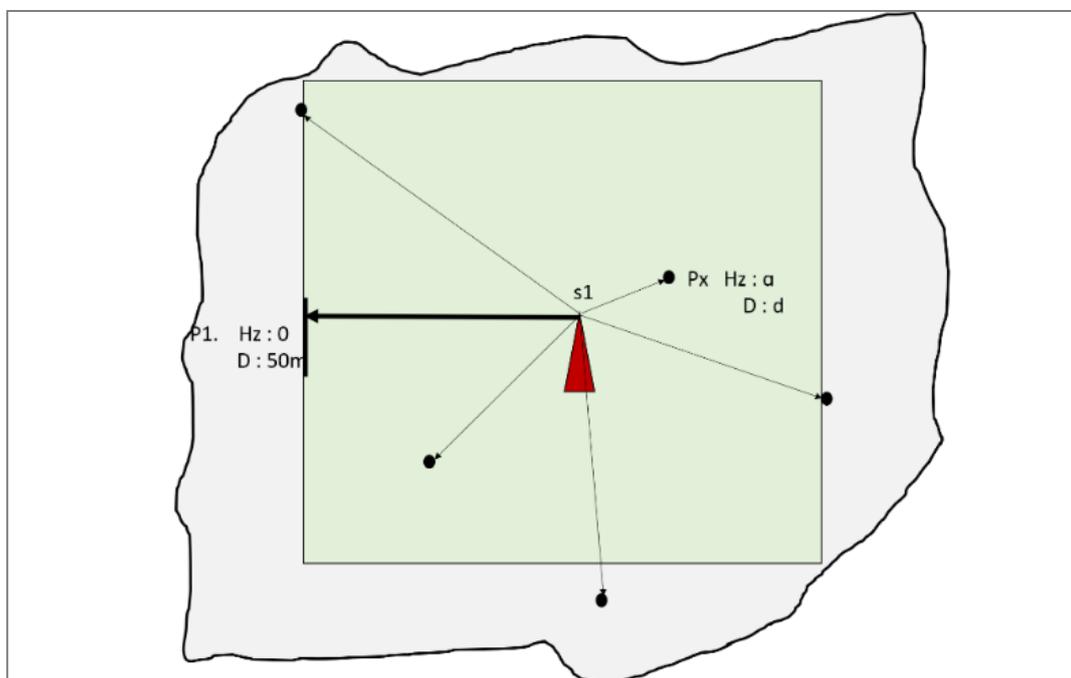


Fig. 11. Méthodologie de cartographie d'une parcelle élémentaire au sein d'un SAFC à l'aide d'une Station totale.

S1 : station totale ; P1 : premier point ciblé ou ligne de base ; Px : point ciblé (arbre) dans la parcelle.

La cartographie a été faite en mode prisme. Celui-ci nécessite que le prisme optique, porté par une perche de 1.30 m, soit déplacé d'arbre en arbre pour enregistrer leur position. La station totale mesure la distance horizontale D du point de station S (emplacement de la station totale) à la cible (arbre). Ceci implique donc que le point de station soit visible afin de viser le prisme placé au pied de la cible (Fig. 12A et B).

Si possible une seule station était faite. Sinon, deux ou plusieurs points de station étaient réalisés et la ligne de base était enregistrée à chaque déplacement du théodolite d'un point de station à l'autre. Pour un point de station $S1$ par exemple, la ligne de base placée à 50 m du théodolite était marquée à l'aide de mètre ruban. Par la suite, une personne fixe au point $S1$ prenait les mesures au théodolite et l'autre déplace le prisme d'arbre en arbre. Les positions (Hz et D) de tous les végétaux ayant un DHP ≥ 10 cm étaient enregistrées. Une étiquette numérotée a été accrochée sur toutes les espèces d'agrumes situées à l'intérieur de la parcelle cartographiée (Fig. 12C).



Fig. 12. Cartographie d'un SAFC.

(A) Observateur ciblant le prisme optique (B) dans une parcelle expérimentale avec des (C) agrumes marqués.

II.2.2.3. Identification et caractérisation des arbres

Toutes les plantes pérennes présentes dans la parcelle ayant un DHP ≥ 10 cm ont été échantillonnées. Pour chaque individu, les noms de l'espèce et la famille ont été identifiés. Cinq groupes, désignés ici « sous-populations » ont été préalablement définis : (i) les cacaoyers, (ii) les arbres forestiers, (iii) les fruitiers autres que les agrumes, (iv) les agrumes et (v) les palmiers.

La caractérisation du peuplement végétal consistait essentiellement à prendre des mesures sur les arbres et à caractériser leur feuillage. Les données prises étaient : la forme de la canopée, qui peut être ellipsoïdale, semi-ellipsoïdale, cylindrique, conique ; la circonférence du tronc, permettant d'avoir le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ; la hauteur du tronc ; la largeur et la hauteur de la canopée ; la hauteur du fut et enfin la densité du feuillage (ou son opacité). Cette dernière valeur

a été quantifiée à l'aide d'une échelle de 0 à 100. A 0, 100 % de la lumière traversant le feuillage de l'arbre atteint le sol, tandis qu'à 100, 0 % de la lumière traversant le feuillage atteint le sol (Fig. 13). Pour les grands arbres forestiers, la mesure de leur hauteur a été effectuée à l'aide d'un clinomètre.

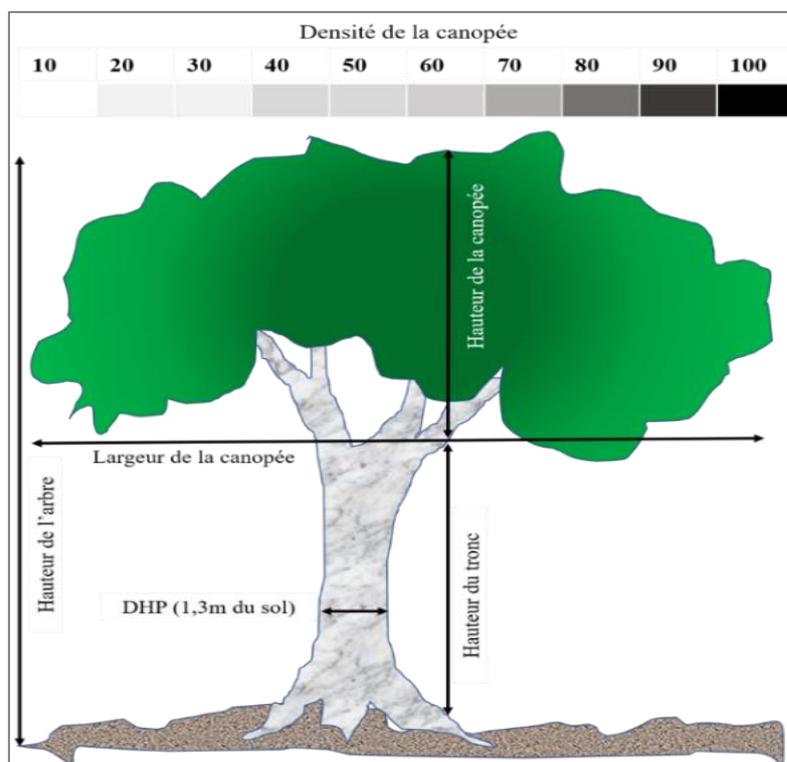


Fig. 13. Illustration des données prises lors de la caractérisation d'un arbre.

II.2.2.4. Analyse des stratégies des producteurs dans le choix des structures spatiales des agrumes dans les SAFC

Plusieurs études ont démontré que la structure spatiale est directement impliquée dans la dissémination des bioagresseurs au sein des SAFC (Gidoin et *al.*, 2014; Ngo Bieng et *al.*, 2017; Ndo et *al.*, 2019a). Ces travaux ont par ailleurs montré que, pour la plupart des bioagresseurs étudiés, l'agrégation des populations hôtes favorise leur dispersion. Par contre lorsque les populations hôtes ont une structure spatiale régulière, la dispersion des bioagresseurs est limitée (Ndo, 2011; Akoutou Mvondo et *al.*, 2020). Cependant, pour les arbres fruitiers, il a été montré que les structures agrégées et même aléatoires sont prédominantes dans les SAFC dans les zones de forêts humides du Cameroun (Ndo, 2011; Gidoin, 2013). Il nous a donc semblé indispensable de connaître les raisons de choix des structures spatiales des agrumes dans les SAFC.

II.2.2.4.1. Profil des producteurs enquêtés et évaluation de la stratégie des producteurs dans le choix des structures spatiales des agrumes

Afin d'investiguer sur les raisons de choix des structures spatiales des agrumes dans les SAFC, une enquête a été faite dans les sites de Bokito, Evodoula, Boumnyebel et Bikok. Au total, 26

producteurs ont été interrogés. Afin de dresser le profil des producteurs, des questions leur ont été posées, permettant de recueillir les informations suivantes : activité principale (agriculture, artisanat, commerce, employé), le nombre d'années passées dans la gestion du SAFC, la formation aux métiers de l'agriculture, mode d'acquisition du SAFC, le mode d'introduction des agrumes dans l'exploitation (régénération spontanée, plantation par le producteur), et enfin le nombre moyen d'agrumes par hectare dans leur exploitation.

Dans cette étude, l'accent a été mis sur les facteurs endogènes qui peuvent influencer directement la disposition spatiale des agrumes. Les raisons conduisant au choix de la position des agrumes dans le SAFC telles que la limitation des parcelles, la gestion de l'ombrage, le remplacement des arbres morts... ont été évaluées.

II.2.2.4.2. Détermination de la typologie des structures spatiales et biodiversité des SAFC

L'analyse de la structure spatiale des SAFC a été par la méthode de Ripley (Ngo Bieng et *al.*, 2013; Kan et *al.*, 2021). La fonction $L(r)$ qui dérive de la fonction $K(r)$ de Ripley permet d'analyser la structure spatiale d'une population hétérogène et de dire si celle-ci est agrégée, aléatoire ou régulière. Pour chacun des 26 SAFC considérés dans cette étude, la fonction $L(r)$ des agrumes a été calculée pour des intervalles de $r = 5$ m, allant de 1 m à 25 m. Le r choisi correspondait à l'environnement local, c'est-à-dire à la zone située à une distance courte ou moyenne de chaque individu (Goreaud et Pelissier, 2000).

Par la suite, et tout en tenant compte des interactions entre les agrumes, l'effet de correction des bordures a été diminué. Pour chaque SAFC, une matrice de 25 variables a été obtenue et 6 valeurs ont été retenues pour caractériser la $L(r)$. Ces 6 variables ont été utilisées pour construire une typologie basée sur la structure spatiale, et ont aussi permis de comparer les trois structures spatiales agrégées, aléatoires et régulières (Gidoin et *al.*, 2014).

II.2.2.4.4. Comparaison des structures spatiales des agrumes déclarées par les producteurs et celles réellement présentes dans le SAFC.

Une fois la structure spatiale des SAFC connue, la Classification Ascendante Hiérarchique a permis de classer les parcelles selon qu'elles avaient une structure spatiale agrégée, aléatoire ou régulière. Par la suite, ces structures spatiales réelles ont été comparées aux structures déclarées par les agriculteurs. Ces comparaisons ont révélé, soit des similitudes, soit des dissimilitudes entre les structures déclarées par les agriculteurs et celles réellement adoptées dans les SAFC. Le taux de coïncidence (C (%)) entre les structures déclarées réellement adoptées et celles déclarées a été calculé (Equation 2).

$$C(\%) = \left(\frac{pi}{P}\right) * 100 \text{ (Équation 2)}$$

Avec pi : nombre de SAFC dont la structure spatiale i correspond effectivement à celle déclarée par le producteur et P : le nombre total de SAFC ayant la structure spatiale i

II.2.3. Détermination facteurs de risque épidémiologique de la gommose

Après une infection initiale, le développement de la maladie résulte de l'action combinée de différents facteurs liés aux conditions environnementales, à la plante hôte, à l'agent pathogène et à l'action de l'agriculteur (Zadoks, 2001; Ndo, 2011; Gidoin, 2013). Dans le cas de la gommose des agrumes en particulier, l'effet de ces différents facteurs n'est pas élucidé dans les zones de forêt tropicale du Cameroun. Aucun modèle prédictif de IG n'a encore été présenté pour déterminer l'action des facteurs abiotiques, biophysiques et agronomiques sur l'intensité de la maladie. Dans cette étude, étant donné le nombre élevé de variables réponse, nous avons utilisé une approche exploratoire, avec l'hypothèse implicite que parmi les facteurs pédologiques, climatiques et agronomiques auxquels le pathosystème *Citrus sp-Phytophthora spp.* est exposé, seuls quelques-uns d'entre eux peuvent prédire IG. L'objectif était de construire, à l'aide d'une analyse de régression PLS, des modèles prédictifs de l'intensité de la PFRD pour la gestion du risque épidémiologique sur les trois principales espèces d'agrumes produites au Cameroun. Le modèle construit, devrait être capable de prédire IG dans la zone d'étude.

II.2.3.1. Collecte des données climatiques et géographiques

Les données climatiques des 20 dernières années des stations météorologiques les plus proches des sites ont été collectées auprès de la Direction de la Météorologie Nationale du Ministère des Transports. Les données prises en compte sont la température, l'humidité relative et pluviométrie. Pour ces données, des moyennes ont été calculées pour chaque site.

II.2.3.2. Obtention des données physico-chimiques des échantillons de sol

Les *Phytophthora* sont des espèces telluriques. Dans cette étude, le postulat fait est que la composition physico-chimique du sol a un effet sur la qualité et la quantité de l'inoculum qui colonise les racines des agrumes ; ce qui pourrait influencer IG (Cocozza et al., 2021; Liu et al., 2022). La détermination de la qualité physico-chimique du substrat devient donc une donnée primordiale pour l'étude des facteurs épidémiologiques.

Des échantillons de sol ont été prélevés dans 2 horizons, à différentes profondeurs, à savoir 0-20 cm et 40-60 cm. Trois échantillons ont été prélevés par horizon au niveau d'une parcelle pour former un mélange complet, puis un échantillon composite a été formulé pour chaque site. A partir de ces échantillons composites, des sous-échantillons ont été extraits et soumis à l'analyse au Laboratoire d'Analyse des Sols, Plantes, Engrais et Eaux de l'Institut de Recherche Agricole pour

le Développement (IRAD). Ceci a permis de déterminer l'humidité du sol, les taux d'argile, de limon fin et grossier, de sable fin et grossier, de la matière organique, le carbone organique, l'azote total, le rapport carbone/azote, le phosphore assimilable, l'aluminium, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, le soufre, la capacité d'échange cationique (CEC), et le potentiel hydrogène (pH) sur chaque site. Les normes de comparaison des variables utilisées pour caractériser les sols ainsi que l'unité de mesure dans laquelle chacune de ces variables est exprimée sont celles recommandées pour la caractérisation des sols (Shepherd et Walsh, 2002).

II.2.5.3. Collecte de données agronomiques

Pour connaître les pratiques culturales appliquées par les agrumiculteurs, une enquête semi-structurée a été menée auprès des 77 agrumiculteurs des neuf sites d'étude. Les données collectées consistaient à connaître le système de production des agrumes, qui pouvait être des jardins de case, des vergers purs en monoculture, des vergers associés à des cultures annuelles, des vergers associés à d'autres arbres fruitiers et des SAFC. Le type de plante (greffée ou non) a également été identifié, ainsi que l'âge des agrumes. Cette dernière variable a permis de classer les agrumes observés en trois classes d'âge, donc ceux âgés de moins de 10 ans, ceux âgés de 10 à 20 ans et ceux âgés de plus de 20 ans. Enfin, le type de traitement phytosanitaire appliqué sur les agrumes a été déterminé. Étant donné qu'aucun traitement spécifique contre la gommose n'est proposé aux agriculteurs par les autorités phytosanitaires (Kuate et al., 2006), il leur a seulement été demandé de préciser le type de produit utilisé : fongicide, insecticide, voire un mélange de ces produits.

Pour le système de production, l'espèce et l'âge des agrumes, le nombre d'arbres observés pour chaque variable a été noté. Par contre, pour le type de traitement, le pourcentage d'agriculteurs a été calculé pour chaque modalité sur le site.

II.2.5.4. Collecte de données épidémiologiques

Les données épidémiologiques ont été collectées sur les oranges (*C. sinensis*), les mandarines (*C. reticulata*) et les pomélos (*C. paradisi*). Sur chaque agrume, la méthode expliquée à la sous-section II.2.1.2. a été utilisée pour quantifier IG sur chaque agrume. Le tableau V ci-dessous présente exhaustivement l'ensemble des variables considérées pour l'exécution de l'analyse PLS.

II.2.4. Evaluation *in vitro* du potentiel de deux agents de lutte biologique contre les

***Phytophthora* identifiés**

Cette activité avait pour objectif de tester *in vitro* l'efficacité de deux agents de lutte biologique sur les espèces de *Phytophthora* préalablement identifiées. Ces tests ont été faits, premièrement avec deux souches de *Trichoderma asperellum* (PR11 et PR12) et en suite, avec des nanoparticules de nitrate d'argent à base d'un extrait aqueux des feuilles de *Tithonia diversifolia*.

II.2.4.1. Tests de bio-efficacité de *Trichoderma asperellum* vis-à-vis de *Phytophthora*

II.2.4.1.1. Confrontation directe entre *Phytophthora* et *Trichoderma asperellum*

II.2.4.1.1.1. Principe et méthodologie

Des confrontations directes ou « technique des cultures opposées » entre deux souches de *T. asperellum* (PR11 et PR12 [Genebank numbers EF186002 et EF185999]) (Mbarga et al., 2020), et quatre espèces de *Phytophthora* ont été réalisées *in vitro* selon la méthode décrite par Nawaz et al. (2018). Elles consistaient à placer en opposition dans les boîtes de Pétri contenant 15 ml de PDA, deux fragments mycéliens de 5 mm de diamètre, à 5 cm l'un de l'autre.

II.2.4.1.1.2. Dispositif expérimental

Au total, 12 traitements ont été constitués avec les deux souches de *T. asperellum* et les quatre isolats de *Phytophthora* dont : *P. citrophthora*, *P. nicotianae*, *P. palmivora*, et *P. cinnamomi*. Le témoin non traité (TNT) était représenté par une culture de chaque espèce de *Phytophthora* seule dans la boîte de Pétri. Le tableau IV ci-dessous résume les traitements formulés.

Un dispositif expérimental en bloc complet randomisé à deux facteurs a été mis en place. Le facteur traitement avait deux niveaux et le facteur agent pathogène en avait cinq. Tout le dispositif a été répété trois fois. Les boîtes de Pétri après inoculation sur PDA ont été rangées de manière aléatoire dans les bacs, puis mises en incubation.

Les repiquages ont été effectués en même temps et l'ensemble des boites a été incubé à l'obscurité pendant 7 jours à 25 °C. Trois répétitions ont été utilisée pour chaque confrontation entre les souches de *T. asperellum* et chaque espèce de *Phytophthora*. La lecture des résultats a consisté à mesurer la croissance mycélienne de l'agent pathogène en direction de l'antagoniste chaque jour. Cette croissance mycélienne a été comparée à celle développée par le témoin. Le taux d'inhibition de la croissance mycélienne induite par *T. asperellum* a été calculé selon l'équation présentée ci-dessous (Degani et Dor, 2021) :

$$IC(\%) = \left(\frac{DT-DPA}{DT} \right) * 100 \text{ (Équation 3)}$$

Avec : *DT* : Croissance mycélienne dans la boîte témoin ; *DPA* : Croissance mycélienne de l'agent pathogène en présence de l'antagoniste ; *IC* (%) : Inhibition de la croissance.

Tab. IV. Dispositif expérimental des confrontations directes.

Facteurs	Antagonistes		Témoin
	<i>T. asperellum</i> PR11	<i>T. asperellum</i> PR12	
Agents pathogènes	T.as-PR11- <i>P. citrophthora</i>	PR12- <i>P. citrophthora</i>	<i>P. citrophthora</i>
	T.as-PR11- <i>P. nicotianae</i>	PR12- <i>P. nicotianae</i>	<i>P. nicotianae</i>
	T.as-PR11- <i>P. palmivora</i>	PR12- <i>P. palmivora</i>	<i>P. palmivora</i>
	T.as-PR11- <i>P. cinnamomi</i>	PR12- <i>P. cinnamomi</i>	<i>P. cinnamomi</i>

II.2.4.1.1.3. Détermination de l'effet fongicide ou fongistatique des souches de *T. asperellum* contre les espèces de *Phytophthora*

Après avoir effectué des confrontations directes entre les souches de *T. asperellum* avec celles des espèces de *Phytophthora*, un fragment mycélien de 5 mm de diamètre a été prélevé à la lisière des deux protagonistes, pour chaque traitement et mis en culture dans des boîtes de Pétri contenant 15 ml de PDA. Trois répétitions ont été réalisées pour chaque traitement. La réémergence de *T. asperellum* (antagoniste) était indicateur du pouvoir fongicide, tandis que celle de *Phytophthora* sp. Indiquait un pouvoir fongistatique de la souche antagoniste en présence.

II.2.4.1.2. Confrontation à distance : action des métabolites volatiles

II.2.4.1.2.1. Principe et méthodologie

Cette méthode consiste à repiquer au centre des boîtes de Pétri et dans deux boîtes séparées contenant le milieu PDA, un explant (5 mm de diamètre) âgé de sept jours de *T. asperellum* (antagoniste) et de *Phytophthora* (agent infectieux). Après 24 heures d'incubation, une superposition des deux boîtes est réalisée, le *T. asperellum* en bas et le *Phytophthora* en haut. La jonction entre les deux boîtes, dépourvues de leurs couvercles était assurée par une bande de parafilm pour éviter toute contamination et perte des métabolites volatiles. Comme pour la confrontation directe, un dispositif expérimental similaire a été utilisé.

Les témoins étaient constitués de deux boites, une à la face inférieure ne contenant exclusivement que le milieu PDA et la face supérieure un explant de 5mm de diamètre de l'agent pathogène. Les boites sont mises en incubation à 25° C à l'obscurité et la notation de la croissance mycélienne a été réalisée pendant sept jours. Le taux d'inhibition de la croissance mycélienne induite par *T. asperellum* a été calculé selon la formule proposée par Tian et al. (2020).

II.2.4.1.2.2. Mycoparasitisme des souches de *T. asperellum* sur les *Phytophthora* des agrumes.

La capacité de colonisation des souches de *T. asperellum* a été évaluée par une technique de double culture (Toghueo et al., 2016). Celle-ci consiste à mesurer la croissance mycélienne de l'antagoniste (T-PR1 et T-PR2) toutes les 12 heures pendant 8 jours à partir du moment où le premier contact a eu lieu jusqu'à ce que l'agent pathogène soit complètement recouvert. Le pourcentage de colonisation de *T. asperellum* au-dessus de *Phytophthora* sp., est calculé par l'Equation 4 (Ezziyyani et al., 2007) :

$$C(\%) = \left(\frac{DTa}{D}\right) * 100 \text{ (Équation 4)}$$

Avec :

- DTa (distance de *Trichoderma asperellum*) : la distance de l'itinéraire par lequel la colonie de *T. asperellum* se développe sur la colonie de l'agent pathogène, en tenant compte de l'axe qui sépare les deux colonies ;
- D : la distance entre les deux colonies ; C (%) : le pourcentage de colonisation.

La description du mécanisme d'action de la souche de *Trichoderma* s'est faite par observations macroscopiques sur les cultures doubles, en tenant compte de l'axe qui sépare les deux colonies. L'invasion de l'antagoniste à la surface du mycélium de l'agent pathogène a été considérée comme l'indice d'efficacité de l'antagoniste ou indice de mycoparasitisme. Le mycoparasitisme a été déterminé par observation microscopique aux grossissements $x40$ et $x100$. Les interactions des hyphes antagonistes avec ceux de l'agent pathogène, soit par enroulement, soit par vacuolisation ou pénétration, ont été recherchées. Les rayons de croissance individuels des antagonistes *T. asperellum* et du *Phytophthora* sp. ont été mesurés à l'aide d'un marqueur de couleur noire toutes les 12 heures jusqu'à ce que la boîte de Pétri soit complètement envahie.

II.2.4.2. Biosynthèse des nanoparticules d'argent à partir de *Tithonia diversifolia* et effet fongicide *in vitro* sur *Phytophthora* spp.

II.2.4.2.1. Collecte et préparation de l'extrait aqueux de *Tithonia diversifolia*

Les feuilles de *Tithonia diversifolia* ont été collectées dans le campus de l'IRAD-Nkolbisson-Yaoundé, avec le spécimen N° 1836 de la collection de l'Herbier National du Cameroun. Ces feuilles ont été lavées à l'eau du robinet, puis à l'eau distillée pour enlever les impuretés. Par la suite, 200 g de feuilles fraîches ont été placés dans un flacon Erlenmeyer contenant 1000 ml d'eau distillée et exposés à une irradiation par micro-ondes pendant 5 minutes. L'extrait aqueux de *T. diversifolia* formés (Td_{EA}) a été filtré à travers un papier Whatman n°42 pour éliminer les fractions insolubles et refroidi à température ambiante avant d'être utilisé comme agent réducteur et stabilisateur.

II.2.4.2.2. Biosynthèse et caractérisation des nanoparticules à base de nitrate d'argent

La biosynthèse des nanoparticules de nitrate d'argent (AgNP) a été faite à partir d'extrait aqueux de *T. diversifolia*. Pour toutes les expériences, la solution d'argent a été préparée en pesant 0,16789 g de nitrate d'argent dissout dans 1 litre d'eau distillée. Trois nanoparticules d'argent ont été synthétisées à 25 °C en mélangeant volume par volume le $AgNO_3$ (1 mM) et le Td_{EA} dans les proportions de 25/75, 50/50 et 75/25. Après 3 minutes, la réduction de Ag^+ a été indiquée par le

changement de couleur du verdâtre au rouge. Cette réduction de Ag^+ indiquait la formation de la AgNP. La figure 14 présente succinctement les différentes étapes de la synthèse des AgNP.

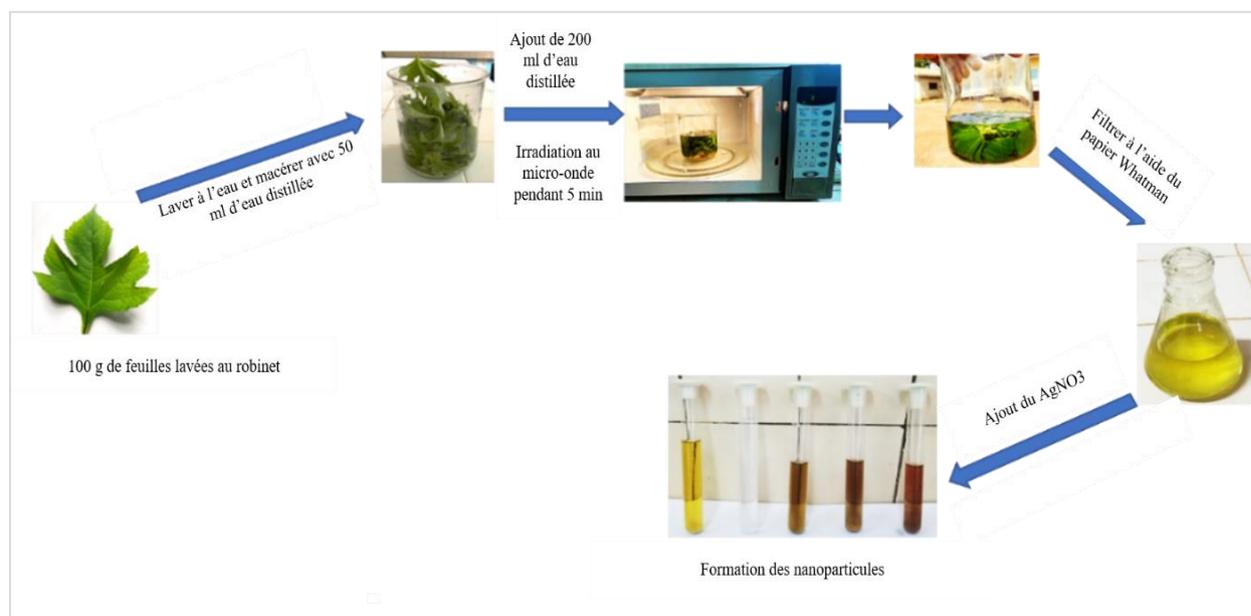


Fig. 14. Étapes de la synthèse des nanoparticules d'argent à partir des feuilles de *Tithonia diversifolia*

(Tran et al., 2013)

Par la suite, 1 mL de chaque mélange a été recueilli et l'absorbance a été mesurée entre 385 et 600 nm en utilisant un spectrophotomètre UV-Vis (modèle 755) après avoir réalisé le blanc avec une solution pure de nitrate d'argent. Le spectrophotomètre UV-Vis a été utilisé car il s'agit d'une méthode pratique pour analyser les ions métalliques sur des propriétés optiques connues sous le nom de résonance plasmidique de surface (SPR) (Tran et al., 2013). Les absorbances de Td_{EA} ont également été enregistrées en utilisant de l'eau distillée avec une conductivité de $1,9 \mu\text{m}/\text{cm}$ et un pH de 6,95 comme blanc dans trois répétitions.

II.2.4.2.3. Tests fongicides *in vitro* des AgNP sur les *Phytophthora* spp.

Des tests de bio efficacité des AgNPs ont été réalisés au laboratoire. A cette fin, sept traitements ont été établis. Il s'agissait de Td_{EA} , de la solution de AgNO_3 (1 mM), de trois AgNPs (25 % AgNO_3 + 75 % Td_{EA} , 50 % AgNO_3 + 50 % Td_{EA} et 75 % AgNO_3 + 25 % Td_{EA}), du fongicide de référence (Metalaxyl-M 6 % + Copper Oxide 60 % ; utilisé à 3,33g/l) et d'un témoin non traité.

Les champignons ont été cultivés dans des boîtes de Pétri contenant du PDA-PARPH. Une solution de 40 μl de chaque traitement a été prélevée et mélangée directement dans le milieu de culture. Après inoculation, les plaques ont été placées dans une chambre noire, à une température de 24°C . Un dispositif expérimental complètement randomisé a été utilisé et répété trois fois. Au total,

84 boîtes de Pétri ont étéensemencées. Des mesures quotidiennes de la croissance mycélienne fongique ont été effectuées après 24 heures pendant 7 jours. Il était question ici de mesurer la croissance des hyphes fongiques sur les deux diagonales, après quoi une moyenne a été calculée pour chaque traitement.

II.2.5. Traitement et analyse des données

II.2.5.1. Encodage et traitement des données

Les données de terrain et de laboratoire ont été saisies et encodées sur divers fichiers sur le tableur Excel de Microsoft Office 2019. Pour chaque fichier, la normalité des données a été vérifiée. Lorsque les données ne suivaient pas la loi normale, une transformation logarithmique ($\text{Log}(x+1)$) a été appliquée.

II.2.5.2. Caractéristiques structurales du SAFC et intensité de la gommose

II.2.5.2.1. Analyse de la structure spatiale des agrumes

L'analyse de la structure spatiale des agrumes dans chaque parcelle a été réalisée par la méthode de Ripley, en utilisant la fonction $L_{(r)}$ de Besag modifiée (Goreaud et Pelissier, 2000). En effet, pour le processus de Poisson (distribution aléatoire), qui sert d'hypothèse nulle, l'espérance du nombre de voisins $E_{(r)} = \lambda \pi r^2$, et donc $K_{(r)} = \pi r^2$. Pour un processus agrégé, les points ont en moyenne plus de voisins que pour l'hypothèse nulle, et donc $K_{(r)} > \pi r^2$. A l'inverse, pour un processus régulier, les points auront en moyenne moins de voisins que pour l'hypothèse nulle, et $K_{(r)} < \pi r^2$. K est l'espérance du nombre de voisins autour de chaque point. $K_{\text{régulier}} < K_{\text{aléatoire}} < K_{\text{agrégé}}$ (Goreaud et Pelissier, 2000; Gidoïn, 2013; Ngo Bieng et al., 2013). La fonction $K_{(r)}$ (Equation 5) n'étant pas facile à interpréter car la courbe obtenue pour l'hypothèse nulle est une parabole, on a utilisé $L_{(r)}$ qui en est dérivé (Equation 5 et 6). $L_{(r)}=0$ indique une distribution aléatoire, $L_{(r)} > 0$: distribution agrégée, $L_{(r)} < 0$: distribution régulière (Fig. 15).

$$K(r) = \lambda^{-1}E(r) \quad (\text{Équation 5}) \qquad L_{(r)} = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r \quad (\text{Équation 6})$$

Dans un deuxième temps, une analyse hiérarchique ascendante par grappes, basée sur la distance euclidienne entre les valeurs de la fonction $L(r)$ des agrumes provenant de différentes parcelles a été réalisée. Ces analyses ont été faites à l'aide des Packages *ade4* et *ads* du logiciel R version 4.1.1.

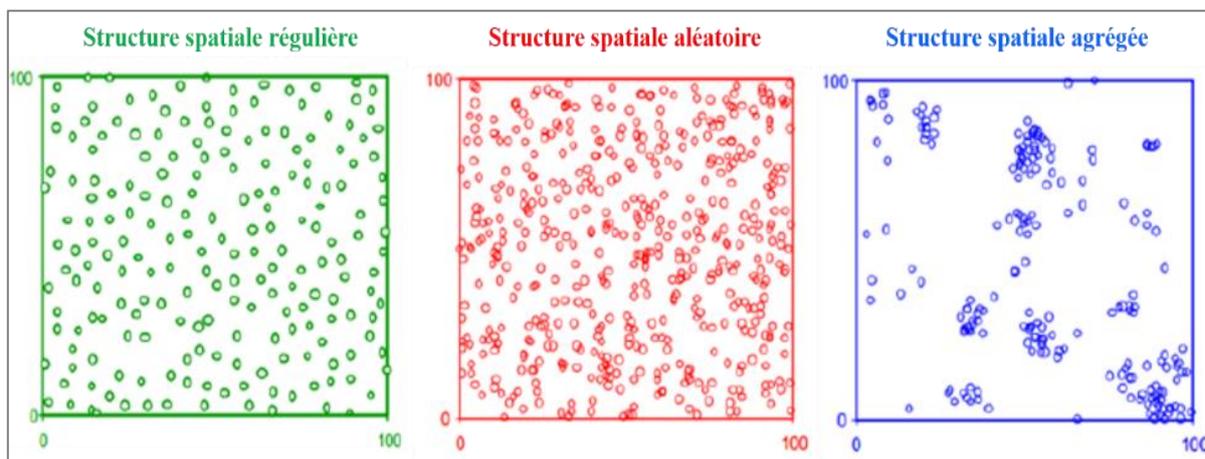


Fig. 15. Illustration des types de structures spatiales au sein des peuplements végétaux.

II.2.5.2.2. Quantification du taux d'ombrage et des interactions entre les paramètres du système et IG

II.2.5.2.2.1. Modélisation de l'ombrage dans les SAFC et reconstruction en 3D des parcelles expérimentales

Le concept de taux d'ombrage utilisé dans cette étude fait référence au "nombre d'heures d'ombrage" reçues par un point de la surface échantillonnée, calculé pendant la période de la simulation. Ce taux d'ombrage a été calculé pour chaque agrume au sein des SAFC échantillonnés en utilisant les logiciels ShadeMotion 5.1.4.2. Les données cartographiques obtenues sur le terrain ont été utilisées pour reconstruire complètement les SAFC en 3D. Ainsi, pour chaque arbre, l'espèce, les coordonnées X et Y, la hauteur du fût, la hauteur et la largeur de la canopée et la densité du feuillage ont été déterminées. Ensuite, un mode de simulation statique a été réalisé avec des superpositions d'ombrages pour quantifier le taux d'ombrage reçu par chaque agrume, et pour chaque parcelle. Ce mode ne tient pas compte de la croissance des arbres, c'est-à-dire que les dimensions de la couronne et du tronc restent constantes et il n'est pas possible de planter ou de retirer des arbres pendant la simulation. En mode statique, la simulation se déroule en continu du début à la fin.

Shademotion permet de compter les heures d'ombre emmagasinées à chaque "point" d'une parcelle pendant une période spécifique. Pendant la simulation, les heures (*moments*) sont les unités de temps de base de la simulation (Somarriba et al., 2021). La quantité d'ombrage reçue par les agrumes a été calculée pour 1 an, entre le 01 janvier 2020 et le 31 décembre 2020. La fréquence des mouvements solaires a été fixée toutes les heures avec 10 heures d'ensoleillement par jour (07h00 à 17h00). L'étude ayant été menée sous les tropiques et à proximité de l'équateur, il a été supposé une durée d'ensoleillement égale pour tous les jours de l'année. En outre, l'angle de pente topographique n'a pas été pris en compte car la plupart des parcelles étudiées étaient situées sur

des terrains relativement plats. L'équation 7 ci-dessous a permis de mesurer les moments totaux, ce qui permet de calculer le nombre total de moments d'une simulation.

La densité de population, qui exprime le nombre d'arbres par unité de surface dans la parcelle, a été calculée (arbres/ha). Afin de tenir compte uniquement de l'ombre projetée au sol par les arbres d'ombrage, les agrumes et les cacaoyers ont été exclus de la simulation. Le taux d'ombrage a été noté à partir de l'emplacement de l'arbre sur la carte d'ombre obtenue après la simulation.

$$Mt = NJS * NMj \quad (\text{Équation 7})$$

Avec Mt : moments totaux ; NJS : nombre de jours de la simulation ; NMJ : nombre de moments par jour.

II.2.5.2.2.2. Détermination des classes d'ombrage dans les SAFC

Une fois le taux d'ombrage reçu par chaque agrume calculé, ces derniers ont été regroupés en trois catégories : (i) les agrumes recevant un taux d'ombrage < 30 % ont été considérés comme placés en plein soleil ; (ii) les agrumes recevant un taux d'ombrage compris entre 30 et 70 % ont été considérés comme placés sous un ombrage léger et enfin, (iii) les agrumes recevant un taux d'ombrage > 70 % ont été considérés comme placés sous un ombrage dense.

II.2.5.2.2.3. Quantification de la biodiversité et mesure de la surface terrière des arbres associés

L'indice de biodiversité de Shannon a été calculé pour les arbres d'ombrage dans chaque parcelle (Equations 8 et 9).

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log P_i \quad (\text{Équation 8}) ; \text{ Avec } P_i = n_i / N \quad (\text{Équation 9})$$

Avec H' , l'indice de Shannon, i une espèce du milieu étudié ; S la richesse spécifique ; P_i la proportion d'une espèce i par rapport au nombre total d'espèces (S) dans la parcelle, qui est calculée selon l'équation (9) ; n_i étant le nombre d'individus pour l'espèce i tandis que N est le nombre total d'individus.

La surface terrière, est une notion largement utilisée en foresterie. Elle dépend à la fois de la grosseur et du nombre d'arbres. La surface terrière donne un renseignement précieux sur la densité d'un peuplement et est liée au volume sur pied. La surface terrière représente la superficie de la coupe transversale d'un arbre mesuré à 1,3 m (DHP) au-dessus du sol qui s'exprime en mètre carré à l'hectare (m^2/ha). La surface terrière (G) des arbres d'ombrage a été calculée pour chaque unité expérimentale en utilisant l'Equation 10. Dans cette équation, D représente le DHP obtenu pour chaque arbre d'ombrage.

$$G = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (\text{Équation 10})$$

II.2.5.2.2.4. Interactions entre les caractéristiques structurales du SAFC et IG

Une fois la normalité des données vérifiée, des analyses de variance ont été faites entre les types de structure spatiale et les différentes classes d'ombrage d'une part et IG d'autres part. Lorsque des différences significatives étaient détectées, des tests de comparaisons de moyennes par le test de *Tukey* à $P=0.005$ ont été faits. Ces analyses ont été faites avec la logiciel R 4.1.1.

Pour déterminer l'effet de l'ombrage sur IG, des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMM), avec une structure d'erreur binomiale ont été réalisés en utilisant la fonction *glmer* du paquet *lme4* de R 2.14.0.

Pour comparer l'effet des différents niveaux d'ombrage sur les moyennes, des contrastes de *Tukey* ont été utilisés avec la fonction *glht* du paquet *multcomp* de R 4.1.1.1 Lorsque seul l'effet principal de l'ombrage était significatif dans le GLMM, l'argument de moyenne d'interaction pour comparer les niveaux d'ombrage moyens sur les termes d'interaction a été utilisé. Lorsqu'une interaction significative entre le niveau d'ombre et l'altitude était détectée dans le GLMM, une comparaison de toutes les combinaisons de niveaux d'ombrage et d'altitude était faite.

II.2.5.3.4. Exécution de la PLS

La projection des structures latentes (PLS), également connues sous le nom de « régression par les moindres carrés partiels », est une méthode multivariée puissante permettant d'intégrer des données provenant de diverses disciplines scientifiques en une seule analyse. Elle a des exigences minimales en ce qui concerne la taille de l'échantillon, la distribution des résidus et les échelles de mesure, tout en traitant une grande quantité d'informations sur quelques observations indépendantes (Esposito Vinzi et al., 2010; Wolf et al., 2013). La méthode PLS a été utilisée pour construire des modèles épidémiologiques pour la cercosporiose des agrumes causée par *Pseudocercospora angolensis* (Ndo, 2011), le dépérissement du frêne (*Fraxinus* spp.) causé par le champignon *Hymenoscyphus fraxineus* (Chan et al., 2021) ; ainsi que dans un large éventail d'autres études agronomiques (Dardonville et al., 2022; Negash et Starr, 2021; Nkurunziza et al., 2020; Perrin et al., 2020).

La PLS est utilisée pour déterminer les relations entre deux matrices X et Y. Les structures de covariance dans ces deux espaces sont modélisées à l'aide d'une approche de variable latente. La PLS, en tant qu'extension de l'analyse en composantes principales (ACP), est utile pour analyser des données comportant de nombreuses variables bruitées, colinéaires, voire incomplètes, dans les variables X et Y. Les variables X pertinentes expliquant la plus grande partie de la variation, la PLS est utilisée pour déterminer les relations entre les deux matrices. Lorsque les variables X

pertinentes expliquent la plus grande variation des variables Y, les performances des modèles de régression PLS s'améliorent. Les variables R^2Y (variation expliquée) et Q^2Y du modèle PLS sont utilisées pour diagnostiquer sa qualité d'ajustement, c'est-à-dire un modèle présentant un équilibre optimal entre la qualité d'ajustement et la capacité de prédiction. Les coefficients PLS sont utilisés pour calculer la qualité de l'ajustement et de la prédiction de chaque variable de réponse, et l'erreur quadratique moyenne (RMSE, %) est utilisée pour évaluer la capacité de prédiction.

IG mesurée sur les orangers, les mandariniers et les pomelos a été utilisée comme variable dépendante (matrice Y, 3 variables). Les variables réponse étaient les valeurs de trois variables climatiques, 19 variables pédologiques et 17 variables agronomiques pour chaque site (matrice X, 39 variables). Le tableau V présenté plus haut décrit ces variables. La méthode PLS a été utilisée pour examiner les relations entre les variables explicatives (X) et les variables d'intensité du PFRD (Y) pour chaque espèce d'agrumes. La méthode est décrite schématiquement dans la figure 16. Les variables influencées par la localisation régionale, telles que les différences climatiques, ont été normalisées (par exemple, la date de plantation, la teneur en argile du sol).

Tab. V. Récapitulatif des variables retenues pour l'analyse PLS.

Variables		Descriptif
Systèmes de production	Jardin de case	Nombre d'agrumes plantés dans un système de production
	SAFC	
	Vergers associés aux autres arbres fruitiers	
	Vergers pures	
	Vergers associés aux cultures vivriers	
Espèces d'agrumes	<i>C. lemon</i>	Nombre d'individus d'une espèce observés
	<i>C. maxima</i>	
	<i>C. medica</i>	
	<i>C. paradisi</i>	
	<i>C. reticulata</i>	
	<i>C. sinensis</i>	
	<i>C. volcameriana</i>	
Age des agrumes	[10-20]	Nombre d'agrumes appartenant à une classe d'âge donnée
	≤10	
	≥20	
Type de plant	Greffé	Nombre d'agrumes greffés ou non
	Plant de semis	
Variables climatiques	Pluviométrie	Valeurs moyennes par site
	T°	
	Humidité relative	
Variables physico-chimiques du sol	Humidité du sol	
	Argile	
	Limon fin	
	Limon gros	
	Sable fin	
	Sable gros	

MO
CO
N _t
C/N
P _{ass}
Al
Ca
Mg
K
Na
S
CEC
pH

MO: matière organique totale; CO: Carbone organique; N_t: Azote total; C/N: rapport carbone sur azote; P_{ass}: phosphore assimilable; Al: aluminium; Mg: magnésium; K: potassium; Na: sodium; S: soufre; CEC: capacité d'échange cationique; pH: potentiel d'hydrogène.

Chaque exploitation a été considérée comme un objet du système, une entité aux interactions complexes. Une valeur a été attribuée à chaque exploitation pour les variables de l'enquête, tandis que la valeur moyenne des variables a été calculée au niveau du champ. La variable "exploitation" peut être exprimée dans les deux matrices PLS. Les deux matrices PLS s'écrivent comme suit : La matrice T contient les scores X, la matrice P contient les charges X, la matrice Q contient les charges Y, et les matrices F et E sont les résidus de la variation inexpliquée dans les tableaux Y et X. La variable latente T détermine la relation entre les tableaux Y et X. La variable inobservable T désigne la relation entre les deux tableaux. La variable non observable T représente la proportion de la variance d'interaction dans la matrice Y qui est expliquée par toutes les variables de la matrice X. L'ensemble des variables détermine le nombre de variables T (ou variables principales). Une procédure de validation croisée a été utilisée pour déterminer le nombre de variables T ou de composantes principales (PC1 et PC2) nécessaires pour prédire de manière optimale la dimensionnalité de la matrice Y (Eriksson et *al.*, 2013).

Étant donné que la performance des modèles de régression PLS s'améliore avec des variables X pertinentes, expliquant la plupart de la variation des variables Y, nous avons utilisé la méthode de filtrage avec l'importance des variables dans la projection (VIP) pour la sélection des variables. Cela signifie qu'après la première exécution du modèle avec les 39 variables X, toutes les variables ayant une $VIP < 1$ ont été éliminées. Un deuxième modèle a été exécuté avec les variables restantes. Une fois le modèle le plus valide trouvé, nous avons déterminé l'adéquation du modèle (R^2Y cumulé, noté R^2Y (cum)) et la capacité prédictive du modèle (Q^2Y cumulé, noté Q^2Y (cum)) pour toutes les variables dépendantes combinées et pour les variables dépendantes individuelles.

La PLS a été faite en utilisant le package mixOmics du logiciel R (Pinu et *al.*, 2019; Rohart et *al.*, 2017). Les valeurs R^2 ont été analysées, ainsi que l'erreur quadratique moyenne de la prédiction et

Q² pour définir la capacité explicative et prédictive du modèle (maximisation, minimisation et maximisation, respectivement).

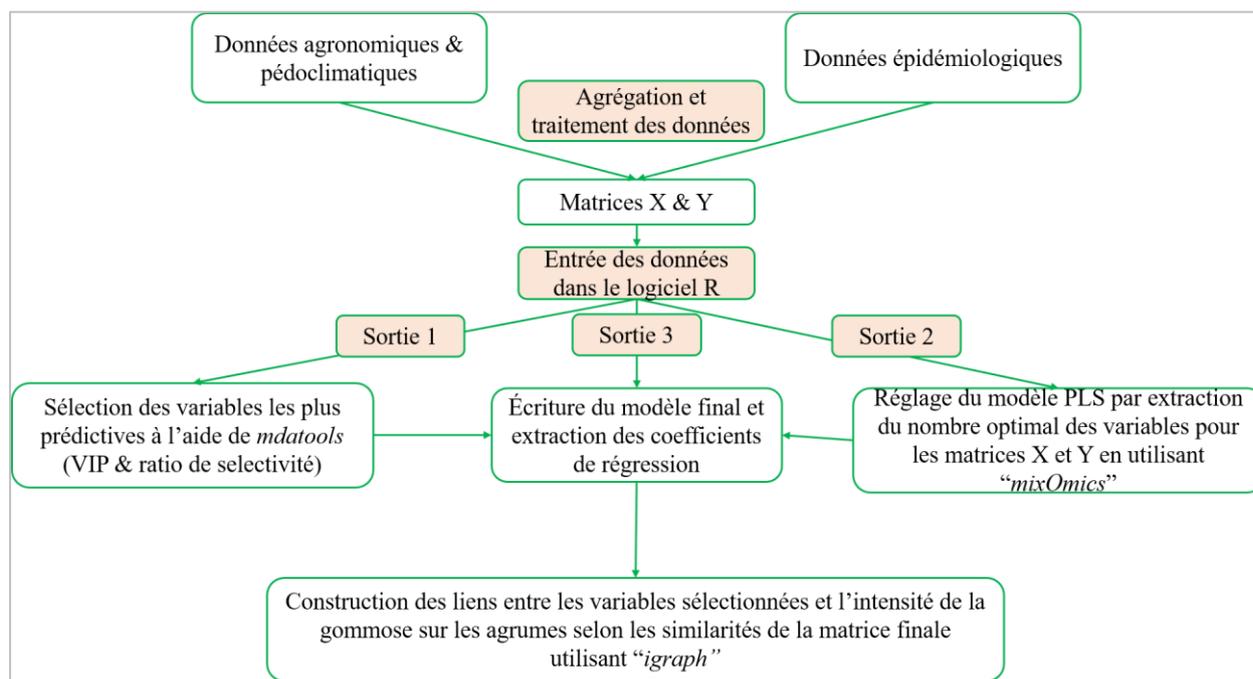


Figure 16. Schéma méthodologique utilisée pour l'exécution de la PLS entre les données d'intensité de gommose sur trois espèces d'agrumes en relation avec les variables pédoclimatiques et agronomiques.

II.2.5.4. Calcul de l'efficacité des agents de lutte biologique

Deux agents de lutte biologique ont été considérés dans cette étude. Il s'agissait de deux souches de *T. asperellum*, et des nanoparticules de nitrate d'argent synthétisées à base d'extrait aqueux de *T. diversifolia* (AgNPs). L'efficacité des souches de *T. asperellum* et des AgNPs à réduire la croissance des souches de *Phytophthora* a été réalisée en comparant le taux de croissance moyen de chaque espèce en présence du traitement au témoin non traité (Equation 11).

$$E_{ff} = \left(1 - \frac{trmt}{trmt - tnt}\right) \times 100 \text{ (Équation 11)}$$

Avec *Eff* : Efficacité ; *trmt* : traitement et *tnt* : témoin traité.

Une analyse de la variance ($P=0.005$) a ensuite été réalisée. Lorsque des différences significatives avaient été observées, le test de *Tukey* a été appliqué pour comparer les moyennes des différents traitements. Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel R 4.1.1.3.

CHAPITRE III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats obtenus dans cette étude. Dans la première section, les résultats (III.1.) sont présentés en quatre parties dont la première porte sur IG et les espèces de *Phytophthora* responsables de la maladie dans la zone d'étude. La deuxième partie traite de l'effet des caractéristiques structurales du SAFC sur IG. La troisième partie quant à elle analyse l'effet des facteurs environnementaux et agronomiques sur IG ; tandis que la dernière partie montre l'activité antifongique *in vitro* de deux agents de lutte biologique sur *Phytophthora* spp. inféodés aux agrumes. Les résultats présentés dans ces différentes parties sont discutés dans la Section III.2.

III.1. Résultats

III.1.1. Intensité de la gommose et espèces de *Phytophthora* responsables de la maladie dans les zones de forêts humides du Cameroun

Le premier objectif de l'étude était de quantifier IG sur les agrumes et d'identifier les espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes dans les sites. Les résultats présentent dans un premier temps IG dans les sites d'étude, en fonction des systèmes de production, des espèces et de l'âge des agrumes.

III.1.1.1. Intensité de la gommose sur les agrumes

Pour les systèmes de production, IG varie de 10,96 % à 41,07 %. Une différence hautement significative ($P=0,001$) entre les systèmes de production a été révélée. Les agrumes plantés dans les vergers en association aux cultures vivrières et ceux plantés dans des jardins de case sont plus attaqués par la gommose, contrairement à ceux plantés dans les vergers en association avec d'autres arbres. IG sur les agrumes dans les sites d'étude varie de 10,01 % (Makondo) à 47,38 % (Evodoula). Une différence hautement significative de IG a été observée entre les sites ($P= 0.001$). Les sites de Kédia et de Makondo ont montré une faible intensité de la gommose ; tandis que ceux de Njombé, Muyuka et Evodoula ont montré une forte intensité de la gommose.

Toutes les espèces d'agrumes observées sont attaquées par la gommose. Entre les espèces, IG varie de 1,66 % (sur *C. medica*) à 38,79 % (sur *C. maxima*). Une différence hautement significative ($P=0.001$) a été observée entre les espèces d'agrumes. *C. medica*, et *C. volcameriana* sont les espèces les moins attaquées. Par contre, *C. maxima*, *C. paradisi* et *C. reticulata* sont les espèces d'agrumes les plus attaquées par la gommose. Selon l'âge des agrumes, aucune différence significative n'a été observée entre les trois classes définies. Toutefois, les agrumes ayant un âge intermédiaire (compris entre 10 et 20 ans), montrent une plus faible intensité de la gommose contrairement à ceux qui sont plus jeunes et ceux qui sont plus âgés (Tab. VI).

Tab. VI. Intensité de la gommose sur le collet des agrumes

Paramètres	Modalités	Gommose des agrumes (moyenne ± écart type)	Anova/Tukey test		
			Df	F value	Pr(>F)
Systèmes de production	Jardins de case	24,30±30,07 ^c	4	32,79	<2e-16 ***
	SAFC	19,10±30,18 ^b			
	Vergers associés aux autres arbres fruitiers	10,96±22,69 ^a			
	Vergers purs	16,66±25,26 ^{ab}			
	Vergers associés aux cultures annuelles	41,07±30,90 ^d			
Sites d'étude	Bikok	12,29±30,40 ^{ab}	9	53,2	<2e-16 ***
	Bokito	19,05±27,94 ^b			
	Boumnyebel	23,82±36,98 ^{bc}			
	Evodoula	47,38±30,79 ^d			
	Goura	26,90±28,89 ^c			
	Kédia	10,83±23,69 ^a			
	Makondo	10,01±18,68 ^a			
	Muyuka	41,32±14,35 ^{cd}			
	Njombé	42,77±32,80 ^d			
Espèces	<i>C. lemon</i>	18,24±24,09 ^{abc}	6	11,12	2,93e-12 ***
	<i>C. maxima</i>	38,79±28,91 ^d			
	<i>C. medica</i>	1,66±3,14 ^a			
	<i>C. paradisi</i>	26,87±34,38 ^{bd}			
	<i>C. reticulata</i>	24,73±31,85 ^{bd}			
	<i>C. sinensis</i>	26,98±27,22 ^{cd}			
	<i>C. volcameriana</i>	2,05±14,53 ^a			
Age (ans)	≤10 ans	23,48±27,85 ^a	2	2,051	0,129
	[10-20]	19,41±28,56 ^a			
	≥20	21,31±30,95 ^a			

Codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '. Pour chaque paramètre, les valeurs des variables suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey à $p < 0,05$).

III.1.1.2. Espèces de *Phytophthora* responsables de la gommose sur les agrumes

Sur la base de leurs caractéristiques morfo-culturelles, quatre espèces de *Phytophthora* ont été identifiées comme agents causaux de la gommose sur les agrumes dans les sites d'étude. Il s'agit de : *P. citrophthora*, *P. nicotianae*, *P. palmivora*, et *P. cinnamomi*.

III.1.1.2.1. Caractéristiques morfo-culturelles de *Phytophthora citrophthora*

Cet isolat était caractérisé par des colonies blanchâtres à faciès légèrement radié, et pétaloïdes avec un mycélium légèrement aérien sur PDA (Fig. 17A) et V8 (Fig. 17B). Les observations microscopiques ont révélé un thalle hyalin coenocytique (Fig. 17C). Les sporanges non-décidus, papillonnés ou bi-papillonnés étaient ovoïdes, obpyriformes ou ellipsoïdes (Fig. 17D,

E et F). Les particularités morpho-culturelles mises en évidence ci-dessus correspondraient à celles de *P. citrophthora* décrites dans les clés d'identification couramment utilisées.

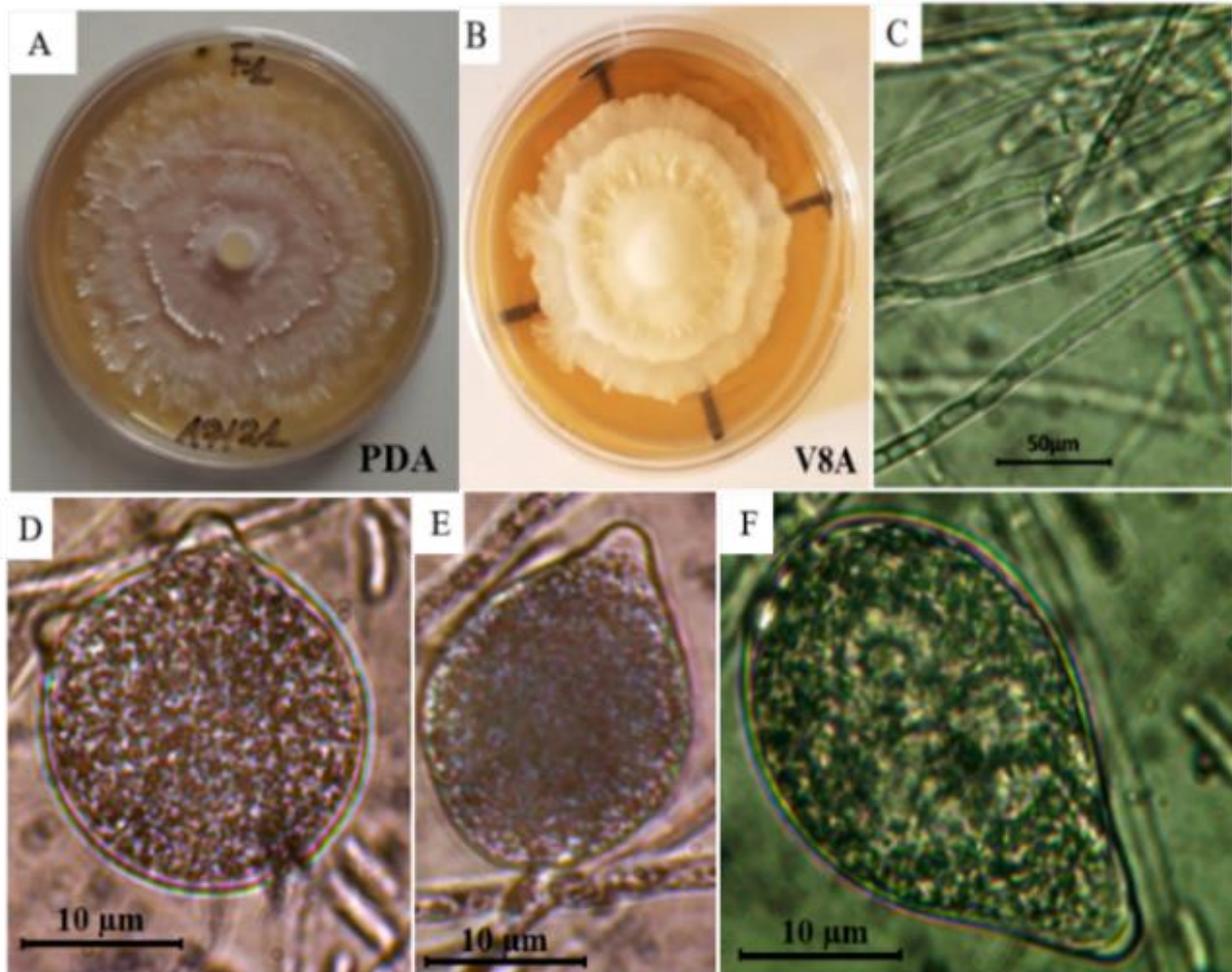


Fig. 17. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de *Phytophthora citrophthora* (A-B) colonies sur milieu PDA et V8, (C) hyphes hyalins coenocytaires, (D) sporanges bi-papillaires, (E - F) sporanges ovoïdes, (G = 400×).

III.1.1.2.2. Caractéristiques morpho-culturelles de *Phytophthora nicotianae*

Le second isolat est caractérisé par des colonies ayant un faciès en rosette, avec un mycélium dense et aérien sur PDA (Fig. 17A), mais dense et soyeux sur V8 (Fig. 17B). Les hyphes sont hyalines coenocytiques (Fig. 17C) ; les sporanges non-décidus sont papillonnés, à pédicelle court et sont ovoïdes, allant de pyriformes à obpyriformes (Fig. 17D et E). Les chlamydospores observées étaient intercalées et/ou terminales entre les hyphes, et très abondantes. Les particularités morpho-culturelles mises en évidence ci-dessous correspondent à celles de *P. nicotianae*.

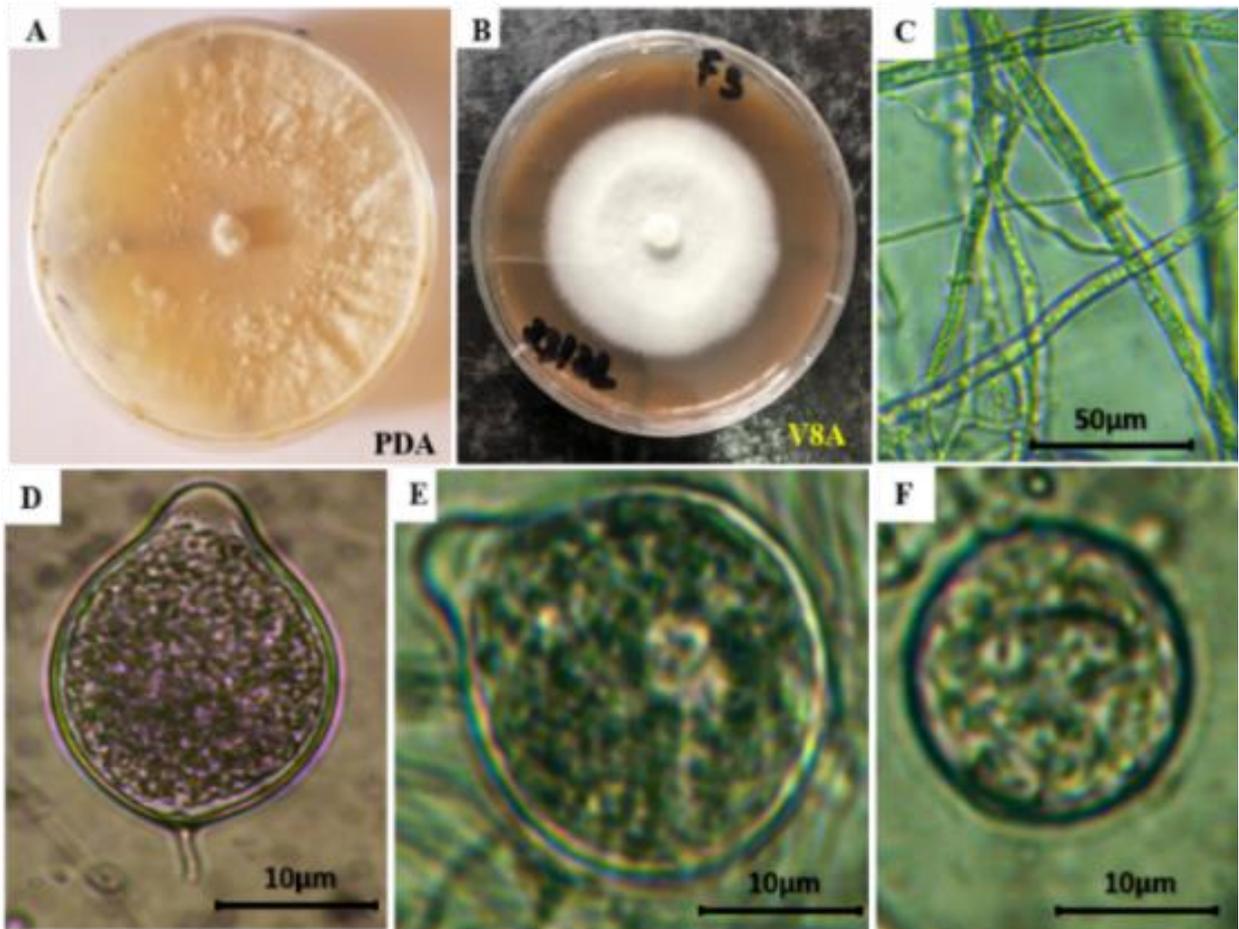


Fig. 17. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de *Phytophthora nicotianae*

(A-B) colonies de *P. nicotianae* sur milieu PDA et V8, (C) hyphes hyalins cœnocytaires; (D) sporange ovoïde; (E) sporange sphérique; (F) chlamydospore en position terminale (G = x400)

III.1.1.2.3. Caractéristiques morpho-culturelles de *Phytophthora palmivora*

Le troisième isolat est caractérisé par des colonies blanches, stellaires, à faciès en forme de rosette avec un mycélium aérien dense et un front de croissance festonné ; plus ou moins cotonneuses sur PDA (Fig. 18A) et très floues sur V8 (Fig. 18B). Les hyphes sont hyalins coenocytiques (Fig. 18C). Les sporanges sont caducs, de forme obovoïde à ellipsoïde avec des papilles proéminentes et un pédicelle court (Fig. 18D, E et F). Les chlamydospores observées étaient abondamment intercalées entre les hyphes (Fig. 18G). Les caractéristiques morpho-culturelles mises en évidence ci-dessus correspondraient à celles de *P. palmivora*.

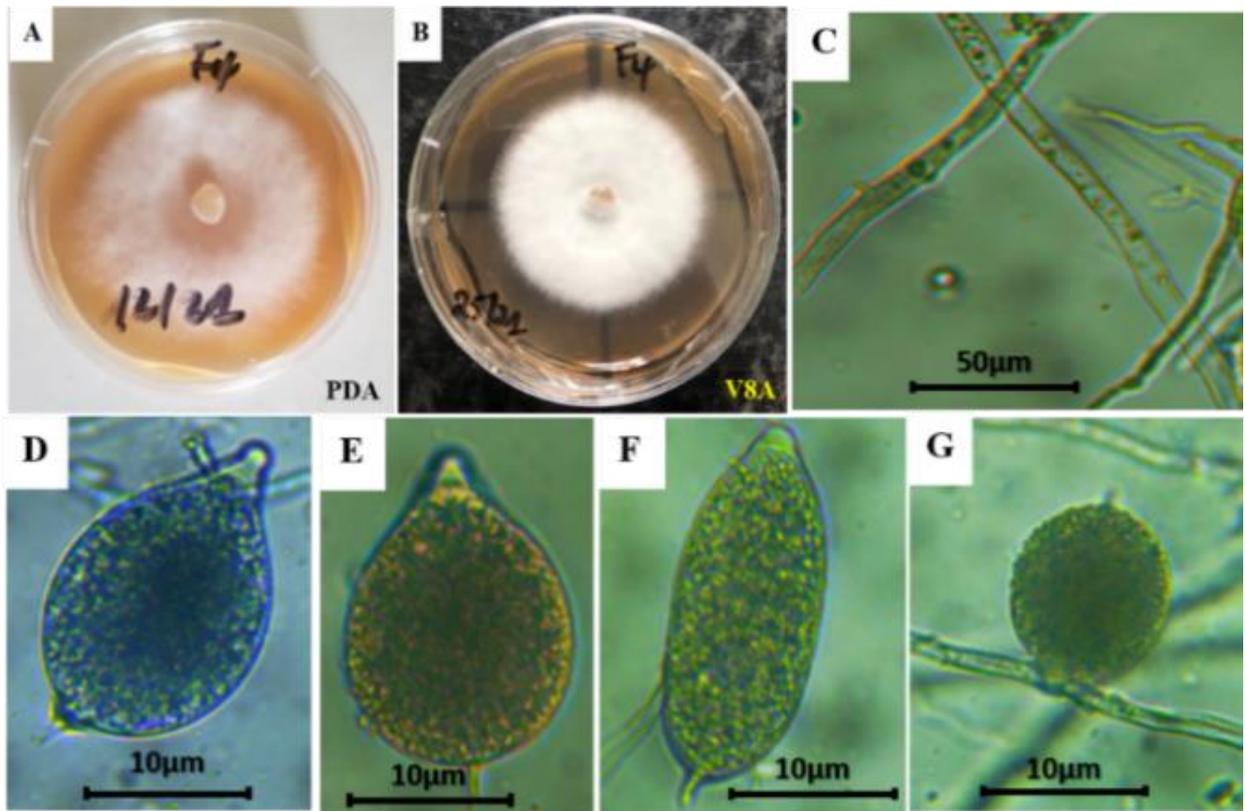


Fig. 18. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de *Phytophthora palmivora*.

(A-B) colonies sur milieu PDA et V8, (C) hyphes hyalins coenocytaires ; (D) sporanges obovoïdes ; (E) sporanges ovoïdes, (F) sporanges ellipsoïdes ; (G) chlamydospore intercalée ou latérale (G = x400).

III.1.1.2.4. Caractéristiques morpho-culturelles de *Phytophthora cinnamomi* var *cinnamomi*

Ce dernier isolat était caractérisé par des colonies blanches, un mycélium aérien dense et très cotonneux sur PDA et sur V8 (Fig. 19A et B). Les hyphes sont siphonnés coralloïdes et hyalins (Fig. 19C). Les chlamydospores en forme de raisin sont groupées et abondantes. Les caractéristiques culturelles et morphologiques mises en évidence ci-dessus correspondraient à celles de *P. cinnamomi* var. *cinnamomi*

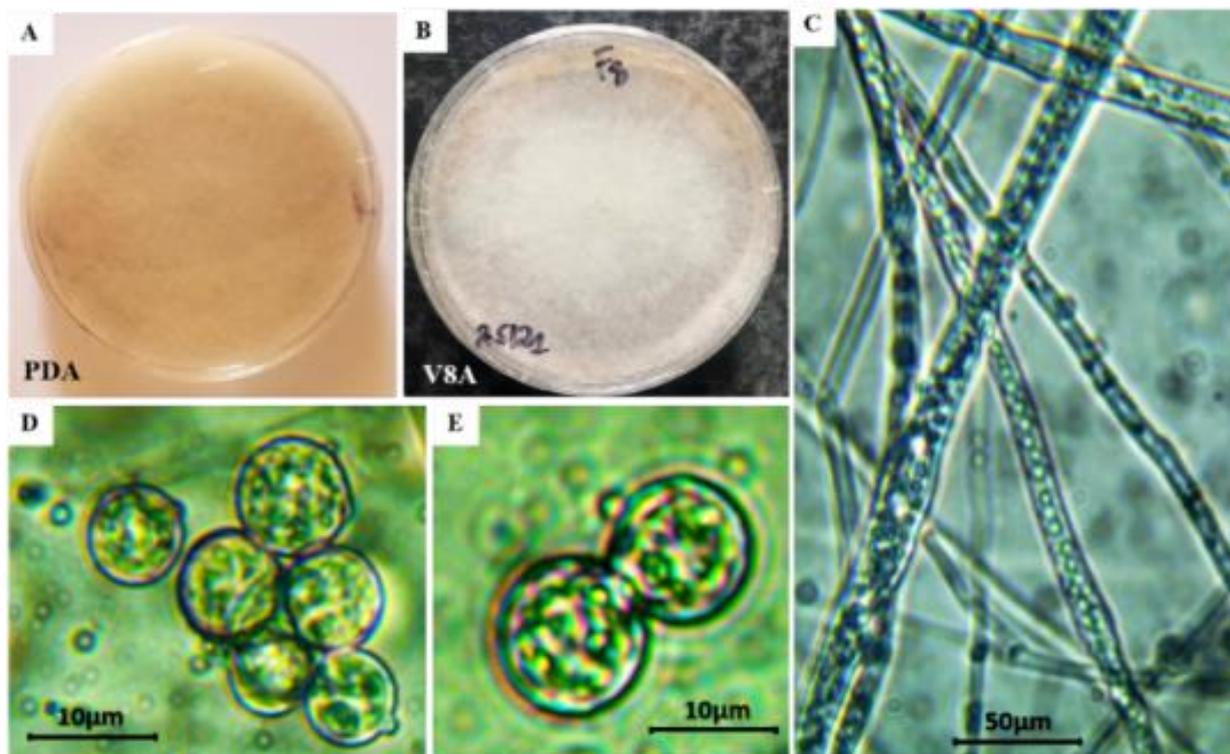


Fig. 19. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de *Phytophthora cinnamomi*.
 (A-B) colonies de *Phytophthora cinnamomi*, sur milieu PDA et V8 ; (C) hyphes coralloïdes coenocytiques ; (D) chlamydospores en grappe de type raisin ; (E) chlamydospores en grappe ; (G = x400).

III.1.1.3. Effet de la température sur la croissance radiale de *Phytophthora* spp.

Les quatre espèces de *Phytophthora* identifiées ont montré une croissance plus ou moins rapide sur les milieux de culture PDA et V8 ; à des températures de 24 °C et 35 °C (Fig. 20). *P. cinnamomi* montre une croissance mycélienne rapide et intense indifféremment de la température et du milieu de culture. *P. palmivora* a montré une croissance mycélienne optimale sur PDA à 24 °C et 35 °C ainsi que sur V8 à 24 °C. Mais sur V8 à 35 °C, la croissance mycélienne de *P. palmivora* a été fortement limitée et cette espèce a enregistré la plus faible croissance mycélienne dans ces conditions. *P. nicotianae* a montré une croissance mycélienne optimale sur PDA. A 35°C la croissance de cette espèce a été considérablement accélérée et au bout de 4 jours, et a atteint son optimum de croissance mycélienne. Sur V8, cette espèce a montré une croissance mycélienne faible.

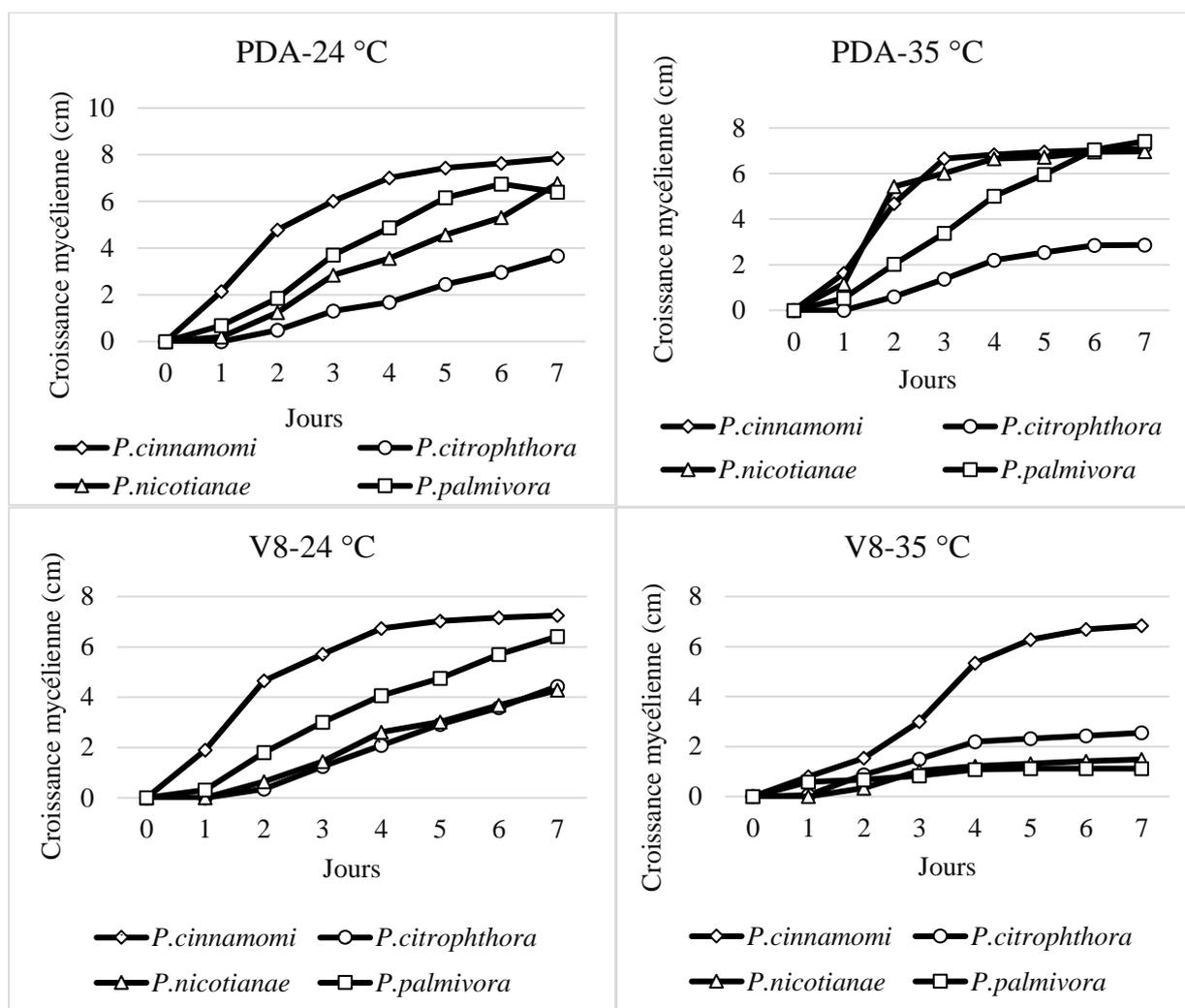


Fig. 20. Croissance mycélienne des isolats de *Phytophthora* à 24°C et 35°C sur PDA et V8.

III.1.1.4. Distribution géographique de *Phytophthora* spp. dans la zone forestière humide du Cameroun

La distribution géographique des espèces de *Phytophthora* dans les zones de forêts humides du Cameroun montre que *P. citrophthora* est l'espèce la plus prévalente et celle qui a une distribution géographique plus large, puisqu'il est présent dans 80 % des sites. Cette espèce est prédominante à Goura, avec une prévalence de 40 % ; à Kédia et Njombé avec une prévalence de 20 % pour chacun des sites. Par contre, *P. citrophthora* est absent à Makondo. En termes de prévalence, *P. citrophthora* est suivie par *P. nicotianae* et *P. palmivora*, qui sont prévalentes chacune à 40 %. *P. nicotianae* n'est présent qu'à Njombé et Makondo, avec des proportions de 20 % des espèces de *Phytophthora* observées. Quant à *P. palmivora*, il n'est présent qu'à Kédia et Goura avec des proportions de 20 % des espèces de *Phytophthora* observées. *P. cinnamomi* n'a été observé que dans le site de Kédia. Cette espèce est la moins représentée avec une prévalence de 20 % (Tab. VII).

Tab. VII. Distribution géographique des *Phytophthora* spp. inféodés aux agrumes dans la zone forestière humide du Cameroun

<i>Phytophthora</i> spp.	Prévalence dans les sites (%)				Prévalence par espèce
	Kédia	Goura	Njombé	Makondo	
<i>P. citrophthora</i>	20	40	20	0	44,44
<i>P. nicotianae</i>	0	0	20	20	22,22
<i>P. palmivora</i>	20	20	0	0	22,22
<i>P. cinnamomi</i>	20	0	0	0	11,11
Nombre d'espèce	3	2	2	1	4

III.1.2. Effet des caractéristiques structurales du SAFC sur IG

III.1.2.1. Composition spécifique et caractérisation des SAFC

III.1.2.1.1. Sous populations d'arbres dans les SAFC

Diverses espèces d'arbres constituent les SAFC. Ces espèces ayant été regroupées en sous populations, les résultats montrent que, les cacaoyers, en tant que culture principale, sont la sous-population prédominante avec une fréquence relative de 80 % des individus observés dans les SAFC. Les cacaoyers occupent moyennement l'espace avec près de 815 arbres/ha. Les agrumes sont la deuxième sous population la plus importante en termes d'effectif. Ils sont présents à une fréquence relative de 8,6 % et l'on compte en moyenne 87.8 agrumes par hectare. C'est dans le site de Bokito que l'on a la plus grande fréquence relative des agrumes dans les SAFC, avec plus de 137 agrumes/ha, donc plus de 14 % des arbres associés aux cacaoyers. A l'inverse, c'est dans le site d'Evoudoula que l'on a observé la plus faible fréquence relative des agrumes, avec moins de 60 arbres/ha, représentant à peine 5 % des arbres associés aux cacaoyers.

Les arbres fruitiers autres que les agrumes constituent la troisième sous-population la plus importante dans les SAFC étudiés. On les rencontre dans tous les sites avec des effectifs de plus de 53 arbres/ha, et une fréquence relative de 5.3 % d'arbres présents dans les SAFC. Les arbres forestiers représentent en moyenne 54 arbres/ha dans les SAFC, pour une fréquence relative d'environ 5,2 %. Pour les arbres forestiers, c'est dans le site de Bikok que l'on a le plus fort effectif, avec une valeur de plus de 101 arbres/ha, pour une fréquence relative de 9 %. Le site de Muyuka est par ailleurs, celui qui montre le plus faible effectif d'arbres forestiers. Quant aux palmiers, ils sont la sous population la moins importante, et ne représentent que 1.1 % des individus observés dans les SAFC. Le site de Boumnyebel est celui qui a le plus grand effectif de palmiers, avec 21 arbres/ha, et une fréquence relative de 2,5 % (Tab. VIII).

Tab. VIII. Fréquences relatives des sous-populations d'arbres constituant les SAFC dans les zones de forêts humides du Cameroun.

Sites	Sous populations des arbres dans les SAFC (Nombre d'arbres par ha)				
	Agrumes	Cacaoyers	Arbres forestiers	Arbres fruitiers	Palmiers
Bikok	72.0±20.9 ^a	832.0±107.4 ^{ab}	103.4±46.0 ^b	89.7±52.6 ^b	25.3±34.9 ^a
Bokito	137.5±75.8 ^b	768.0±102.5 ^{ab}	32.0±18.4 ^a	16.5±9.1 ^a	8.6±7.7 ^a
Boum.	72.8±16.3 ^{ab}	639.2±196.9 ^a	51.2±20.3 ^a	87.2±34.1 ^b	25.6±13.7 ^a
Evodoula	58.2±6.0 ^a	992.5±175.3 ^b	66.2±23.6 ^{ab}	50.2±10.5 ^{ab}	10.2±6.0 ^a
Muyuka	86.6±34.5 ^{ab}	819.3±249.4 ^{ab}	24.6±15.1 ^a	18.6±10.3 ^a	7.0±6.0 ^a
Df	4	4	4	4	4
F value	4.01	3.48	8.92	9.97	1.42
Pr(>F)	0.05	0.05	0.001	0.001	0.1

Dans la même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey à $p < 0,05$).

III.1.2.1.2. Biodiversité des SAFC et surface terrière des arbres associés

La biodiversité dans les SAFC étudiés varie considérablement entre les sites (Fig. 21). Les sites d'Evodoula et de Bikok sont ceux qui ont la plus forte biodiversité avec un indice de Shannon (H') de 3,01 et 2,87 respectivement. Le site de Muyuka est celui dans lequel les SAFC sont les moins biodiversifiés, avec un H' de 1,64 (Fig. 21).

La surface terrière (G) occupée par les arbres varie également entre les sites. Le site de Bokito montre une très forte surface terrière, avec une valeur de $G = 2\,173\text{ m}^2/\text{ha}$. Bikok, Evodoula et Boumnyebel ont des valeurs intermédiaires, tandis que Muyuka a la plus faible valeur de $G = 1\,010,34\text{ m}^2/\text{ha}$ (Fig. 21).

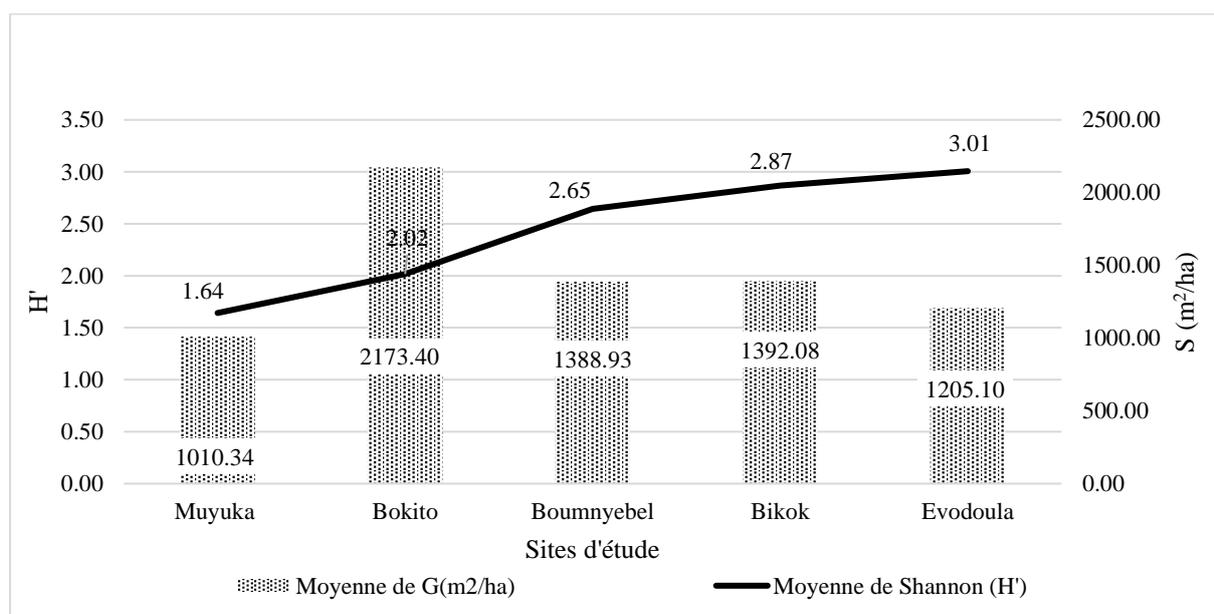


Fig. 21. Estimation de la biodiversité et de la surface terrière.

III.1.2.1.3. Abondance des arbres associés dans les SAFC

En dehors des agrumes, plus de 50 espèces d'arbres associés ont été identifiées dans les SAFC étudiés. *Dacryodes edulis* est l'espèce la plus fréquente et représente à elle seule plus de 22 % des arbres associés dans les SAFC. Quatre autres espèces d'arbres fruitiers figurent dans ce classement. Il s'agit de *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Spondias dulci* et *Annona muricata*.

Outre les espèces d'arbres fruitiers, quatre espèces d'arbres forestiers figurent dans ce top 10 d'espèces d'arbres d'ombrage dans les SAFC. Il s'agit de *Ceiba pentandra*, *Glyricidia sepium*, *Terminalia superba* et *Spathodea campanulata*. *Elaeis guineensis* occupe également une place importante dans ce classement. Ces 10 espèces prises ensemble représentent 73,3 % des espèces associées dans les SAFC, pour un effectif moyen de 152,4 arbres/ha (Tab. IX).

Tab. IX. Top 10 des arbres associés les plus fréquentes dans les SAFC

Espèce	Fréquence des arbres dans les SAFC					Total
	Bikok	Bokito	Boumnyebel	Evodoula	Muyuka	
<i>Dacryodes edulis</i>	22,9	23,6	29,8	13,5	20,8	22,1
<i>Elaeis guineensis</i>	9,6	11,8	13,2	5,9	9,7	9,7
<i>Mangifera indica</i>	10,6	0,9	12,2	8,6	6,9	9,1
<i>Persea americana</i>	8,2	5,5	9,8	11,3	11,1	9,1
<i>Ceiba pentandra</i>	0,8	17,3	0,5	0,9	2,8	2,7
<i>Glyricidia sepium</i>	1,9	0,0	0,0	8,1	0,0	2,5
<i>Terminalia superba</i>	0,5	2,7	2,9	3,6	1,4	2,0
<i>Spondias dulci</i>	1,1	2,7	2,9	2,7	0,0	1,9
<i>Spathodea campanulata</i>	1,9	0,0	0,5	4,1	0,0	1,7
<i>Annona muricata</i>	0,0	0,0	1,0	5,4	0,0	1,4

III.1.2.2. Effet du taux d'ombrage dans les SAFC sur IG

III.1.2.2.1. Reconstitution en 3D et Modélisation des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

Les SAFC étudiés ont été reconstitués en 3D après modélisation de l'ombrage. La coupe transversale des SAFC, met en évidence la structure verticale des parcelles et permet d'apprécier la stratification des systèmes (Fig. 22A et B). Aussi, la complexité des SAFC, liée à leur diversification est mise en évidence à l'aide des vues aériennes de la structure horizontale (Fig. 22B et E). Les figures 22C et 22F par ailleurs, montrent la structure spatiale des SAFC en 2D. Les points dans les deux parcelles représentent les arbres. Le taux d'ombrage cumulé par les points dans la parcelle varie fortement selon les parcelles et à l'intérieur des parcelles.

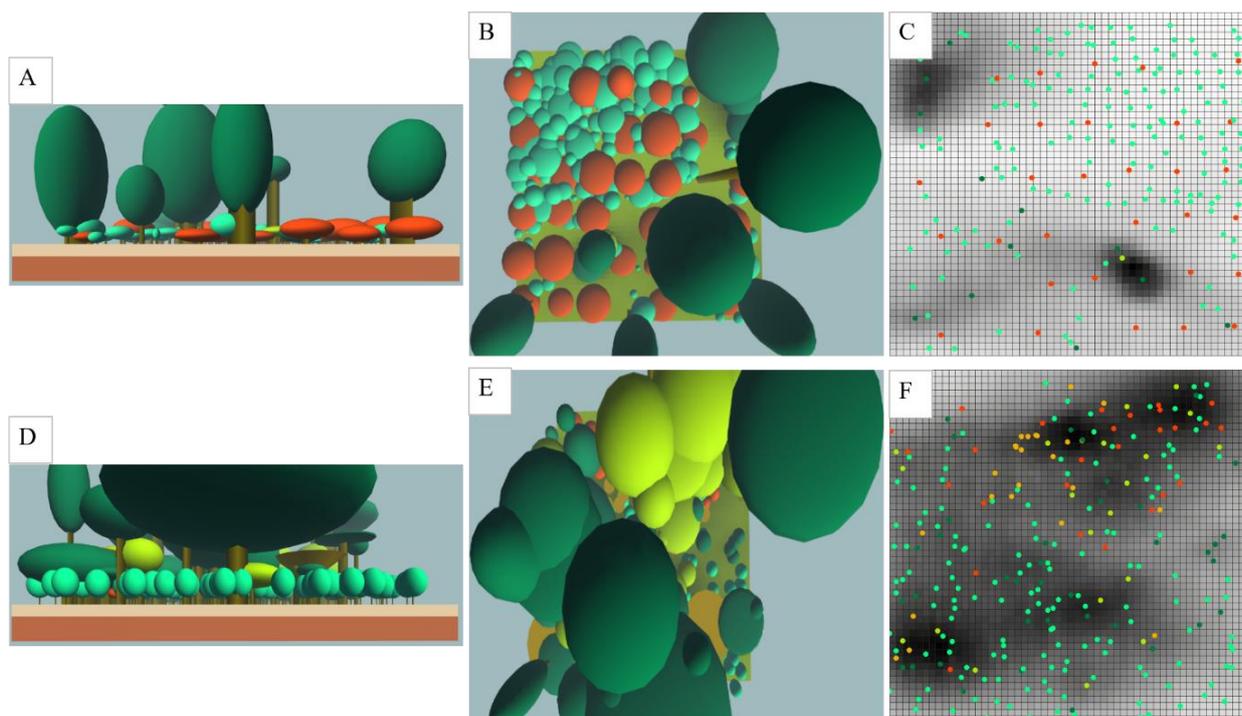


Fig. 22. Variation du taux d'ombrage dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

Illustration des deux SAFC, l'un faiblement diversifié (A et B) avec une carte d'ombrage relativement claire (C) ; et l'autre très diversifié (D et E) ; avec une carte d'ombrage très sombre.

III.1.2.2.2. Variation du taux d'ombrage dans les SAFC

La simulation effectuée dans les différents SAFC a permis de quantifier le taux d'ombrage cumulé, reçu par chaque agrume, et pour chaque parcelle pour une période d'un an. Le taux d'ombrage moyen dans les SAFC varie de 17% à près de 74 %. L'analyse de la variance a montré une différence très significative ($P = 0,001$) entre les sites. Le site de Bikok présente le taux d'ombrage le plus élevé (73,75 %), tandis que Muyuka a le taux d'ombrage le plus faible (16,57 %).

Pris indifféremment de leurs sites, mais en tenant compte de leur situation dans les SAFC, une forte variabilité du taux d'ombrage a été observée. Il ressort ainsi que la majorité des agrumes, 45 % sont situés sous un ombrage dense ; avec un taux d'ombre > 70 %. Plus de 25 % des agrumes observés sont situés sous un ombrage léger, ayant enregistré un taux d'ombrage compris entre 30 et 70 %. Enfin, 30 % des agrumes observés sont situés en plein soleil, avec un taux d'ombre < 30 % (Tab. X).

Tab. X. Taux d'ombrage moyen dans les sites d'étude et pourcentage d'agrumes placés dans différentes conditions d'ombrage

Sites	Taux d'ombrage (%)	Anova/test de Tukey		
		Df	F value	Pr(>F)
Bikok	73,75±37,24 ^d	4	85,16	0.001
Bokito	51,99±27,46 ^c			
Boumnyebel	70,16±31,66 ^d			
Evodoula	38,04±38,36 ^b			
Muyuka	16,57±10,93 ^a			
Proportion d'agrumes selon le taux d'ombrage (%)				
Ombrage dense (Taux d'ombrage ≥ 71 %)		45,08		
Ombrage léger (31 ≤ Taux d'ombrage ≤ 70%)		24,61		
Plein soleil (0 ≤ Taux d'ombrage ≤ 30%)		30,29		

Dans la même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey à $p < 0,05$).

III.1.2.2.3. Relation entre le taux d'ombrage et les variables déterminant la biodiversité dans les SAFC

La relation entre la biodiversité dans les SAFC et le taux d'ombrage a été étudiée. On observe une corrélation positive entre la biodiversité dans les SAFC et le taux d'ombrage dans le sous étage (Fig. 23A). Plus l'indice de Shannon est élevé, plus le taux d'ombrage l'est également. Les SAFC des sites de Muyuka et de Bokito sont les moins biodiversifiés ($0 \leq H' \leq 0,8$) ; et c'est dans ces derniers que l'on rencontre les plus faibles taux d'ombrage (taux d'ombrage ≤ 30 % ; et ≤ 70 % respectivement). Dans les sites de Boumnyebel et de Bikok, les SAFC sont moyennement biodiversifiés ($0,8 \leq H' \leq 1$), mais avec de forts taux d'ombrage (30 % \leq taux d'ombrage $\leq +120$ %). A Evodoula cependant, on observe des SAFC fortement biodiversifiés ($0,8 \leq H' \leq 1.5$), mais ayant des taux d'ombrage moyens (31 % \leq taux d'ombrage ≤ 100 %).

La relation entre le taux d'ombrage et la surface terrière (m^2/ha) des arbres associés dans les SAFC (à l'exception des cacaoyers et des agrumes), dans les cinq sites d'étude a été mise en évidence (Fig. 23 B). Dans les sites de Muyuka, Bokito Boumnyebel et Bikok, l'on observe une corrélation positive entre le nombre d'arbres associés et le taux d'ombrage. Plus la surface terrière est élevée, plus le taux d'ombrage l'est aussi. Dans les sites de Muyuka, Evodoula, Boumnyebel et Bikok, on observe des valeurs de surface terrière relativement faibles ($0 \leq G \leq 400$) avec des taux d'ombrage largement étendus (0 % \leq taux d'ombrage ≤ 120 %). Le site de Bokito montre une situation assez particulière avec des valeurs de surface terrière très élevées ($100 \leq G \leq 1200$) et des valeurs de taux d'ombrage intermédiaires (30 % \leq taux d'ombrage ≤ 70 %).

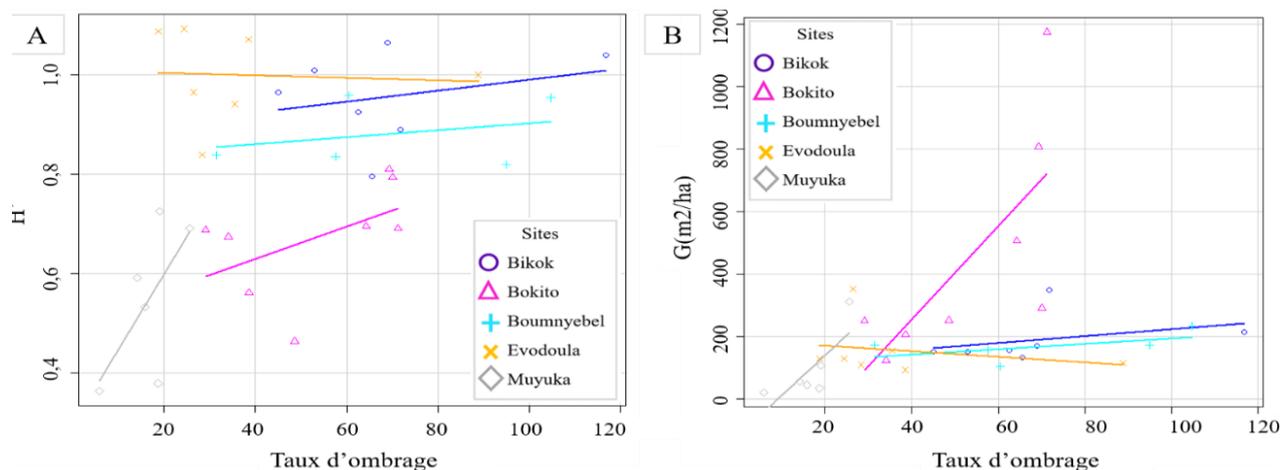


Fig. 23. Variation du taux d'ombrage dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers
Selon la biodiversité (A) et la surface terrière (B)

III.1.2.2.4. Effet du taux d'ombrage sur IG

L'effet du taux d'ombrage sur IG a été analysé dans les cinq sites. L'analyse de variance faite a permis de comparer IG selon que les agrumes étaient situés sous ombrage dense, ombrage léger ou en plein soleil dans chaque site.

Dans les sites de Bikok, Evodoula et Muyuka, des différences hautement significatives ($P=0,001$) de IG selon les niveaux d'ombrage ont été observées. A Boumnyebel et Bokito, on observe des différences significative ($P=0,01$ et $P=0,05$) respectivement. Pour les cinq sites d'étude, les agrumes plantés sous un ombrage dense sont moins attaqués par la gommose, que ceux situés en plein soleil (Tab. XI).

Tab. XI. Effet du taux d'ombrage sur IG des agrumes.

Sites	Intensité de la gommose (Moy. ± Ecart type)			Anova/Tukey test		
	Omb. dense	Omb. léger	Sans ombrage	Df	F val.	Pr (>F)
Bikok	25,55±3,70 ^a	30,20±15,30 ^b	38,50±10,01 ^c	2	13,64	0.001 ***
Bokito	32,02±18,10 ^a	35,35±20,23 ^{ab}	39,58±20,68 ^b	2	3,083	0.05 *
Boumnyebel	37,30±23,27 ^a	47,61±31,52 ^{ab}	71,42±36,59 ^b	2	5,8	0.01 **
Evodoula	33,92±19,50 ^a	54,31±21,20 ^b	55,88±23,86 ^b	2	9,603	0.001 ***
Muyuka	32,14±18,89 ^a	40,32±25,74 ^a	72,78±26,34 ^b	2	20,93	0.001 ***

Dans la même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey à $p < 0,05$).

III.1.2.2.5. Effet antagoniste du taux d'ombrage et de IG

A l'échelle des sites, l'effet antagoniste du taux d'ombrage sur IG dans chaque parcelle a été observé. Plus le taux d'ombrage était élevé, notamment dans les sites de Bikok, Boumnyebel et Bokito, plus IG est faible (Fig. 24).

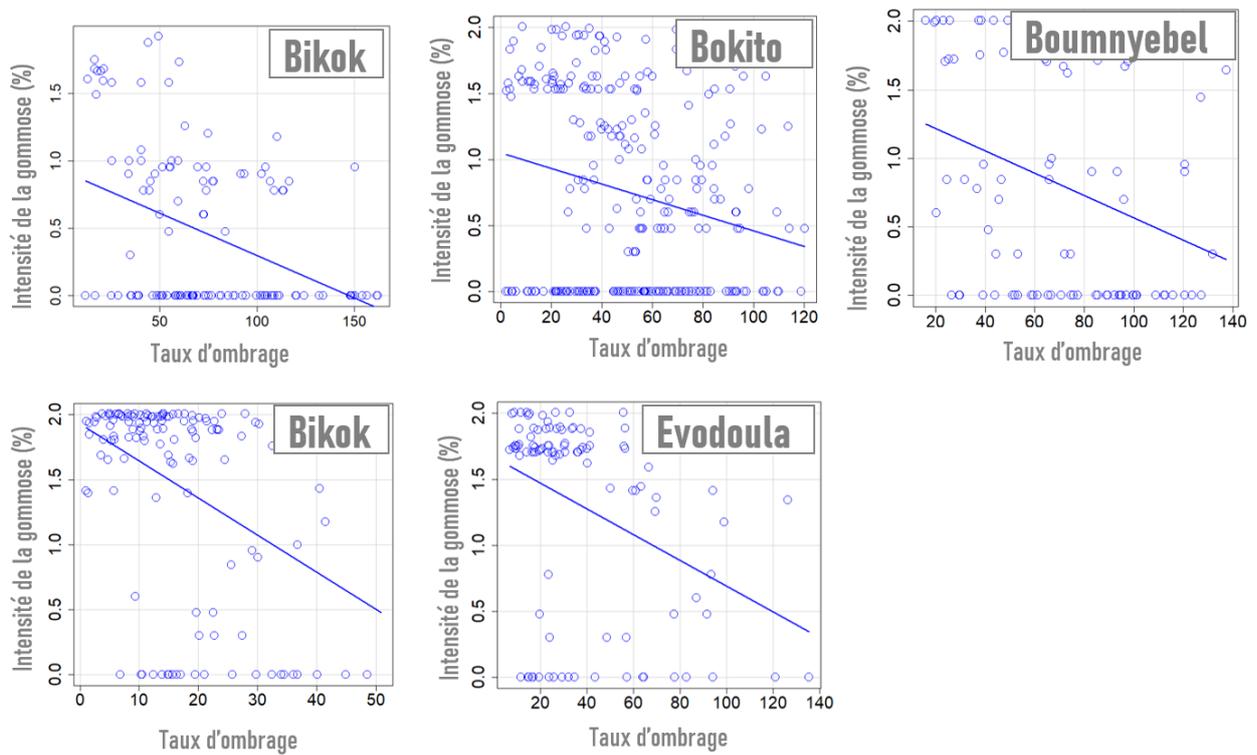


Fig. 24. Relation entre le taux d'ombrage et intensité de la gommose des agrumes.

Dans les sites de Bikok (A) Bokito (B), Boumnyebel (C), Evodoula (D) et Muyuka (E)

III.1.2.3. Effet de la structure spatiale des agrumes dans les SAFC sur IG

III.1.2.3.1. Structure spatiale des agrumes dans les SAFC

L'analyse de la structure horizontale des agrumes dans les SAFC a permis de mettre en évidence trois types de structures spatiales. Il s'agit des structures spatiales agrégées, aléatoires et régulières. Le dendrogramme de la figure 25 présente la répartition des SAFC étudiés selon la structure spatiale des agrumes. Il est montré que dans 30 % des SAFC, les agrumes ont une structure spatiale agrégée. Dans 48 % des SAFC, les agrumes ont montré une structure spatiale aléatoire ; et ce n'est que dans 22 % des SAFC que les agrumes ont montré une structure spatiale régulière.

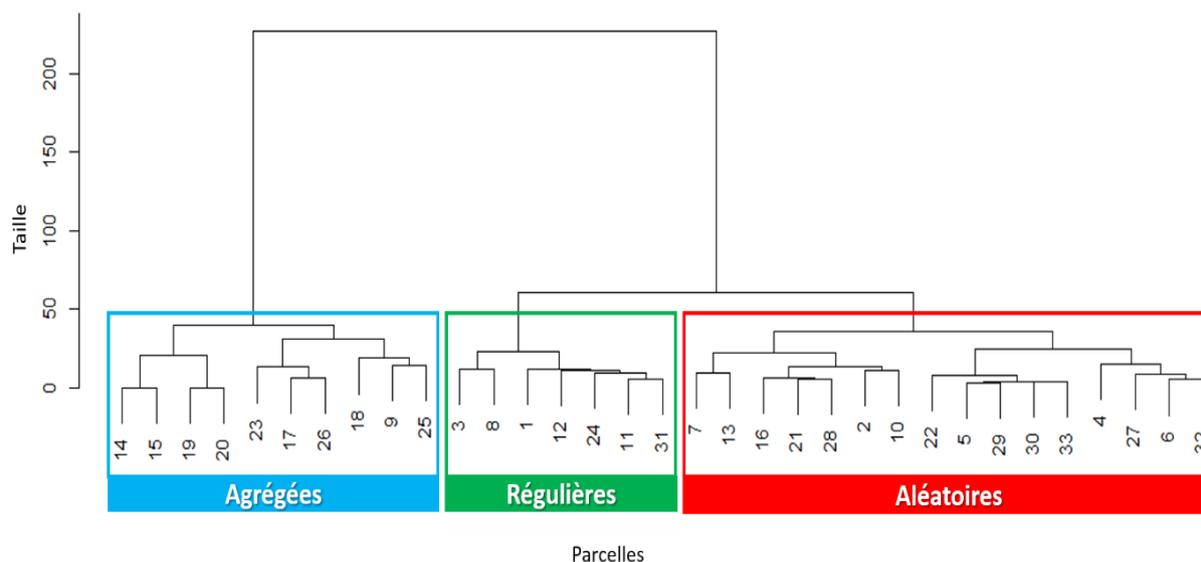


Fig. 25. Regroupement des parcelles d'étude selon leur structure spatiale agrégée, aléatoire et régulière.

III.1.2.3.2. Typographie des structures spatiales observées et variabilité de la fonction $L(r)$

III.1.2.3.2.1. Structure spatiale régulière des agrumes dans les SAFC

Dans l'ensemble, seuls 20 % des SAFC ont montré une structure spatiale régulière. Trois de ces parcelles ont été trouvées à Evodoula, deux à Muyuka, une à Bokito et une à Boumnyebel. A Bikok, aucune parcelle avec une structure spatiale régulière n'a été trouvée. Dans ces parcelles, les agrumes gardent une certaine régularité dans leur distribution.

La figure 26A montre un SAFC au sein duquel les agrumes ont une structure spatiale régulière dans le site de Muyuka. La figure 26B met en évidence la structure spatiale régulière de la sous population des agrumes au sein du SAFC. La figure 27 par ailleurs présente la courbe de la fonction $L(r) \leq 0$. Ce qui confirme la régularité de la structure spatiale des agrumes dans cette parcelle. Cette courbe sort de l'intervalle de confiance entre 0 et 10 m, avec un pic à 5 m. Ceci indique que, les agrumes sont régulièrement distribués avec un écartement d'environ 5 m.

La fonction $L(r)$ des SAFC dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale régulière montre une grande variabilité ($1,96 \leq L(r) \leq 3,01$), avec des valeurs $L(r)$ négatives à de faibles distances (L_1 et L_5). Aux grandes distances, les valeurs de $L(r)$ tendent à devenir positives et donc vers des structures plutôt agrégées (Tab. XII).

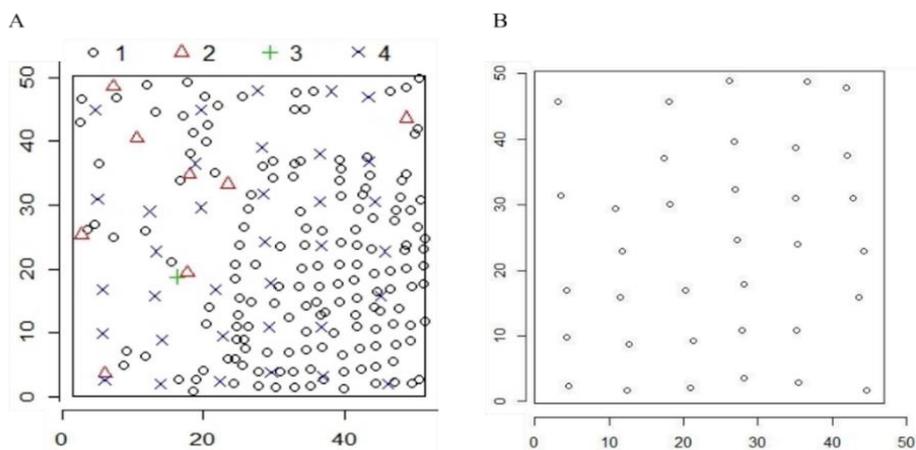


Fig. 26. Cartographie d'un système agroforestier à base cacaoyers ayant une structure spatiale régulière des agrumes.

(A) carte de la parcelle complète et (B) carte de la disposition des agrumes. (1), arbres forestiers (2), autres arbres fruitiers (3) et agrumes (4)

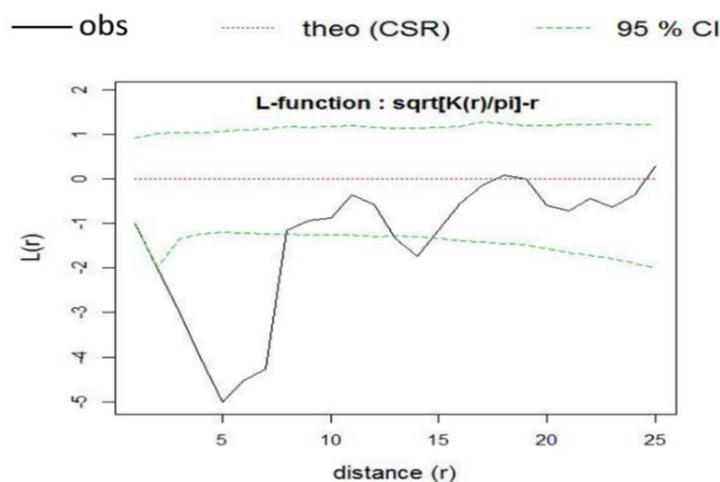


Fig. 27. Fonction $L(r)$ représentant une distribution régulière des agrumes dans un SAFC

III.1.2.3.1.2. Structure spatiale aléatoire des agrumes dans les SAFC

Les structures spatiales aléatoires des agrumes sont prédominantes et sont présentes dans 50 % des SAFC étudiées. Les structures spatiales aléatoires sont présentes dans tous les sites, mais particulièrement à Bokito où les agrumes ont montré ce type de structure spatiale dans six des huit SAFC étudiés. Le site de Muyuka a également montré une prédominance des SAFC dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale aléatoire. Ainsi, pour les sept SAFC étudiés dans ce site, les agrumes ont montré une structure spatiale aléatoire dans quatre. De même à Evodoula, c'est dans trois des sept SAFC étudiés que les agrumes ont montré une structure spatiale aléatoire. A Boumnyebel cependant, ce n'est que dans deux des cinq SAFC que l'on a rencontré ce type de structure spatiale.

La figure 28A montre un SAFC étudié dans le site de Bokito (parcelle 30). Dans cette parcelle les agrumes ont une structure spatiale aléatoire (Fig. 28B). La figure 29 par ailleurs montre une courbe de la fonction $L(r) = 0$, indiquant que la courbe de la fonction $L(r)$ demeure dans l'intervalle de confiance. Ceci atteste de la qualité aléatoire de la distribution spatiale des agrumes au sein de la parcelle. Pour les SAFC dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale aléatoire, les valeurs de $L(r)$ varient entre -1,36 et 0,11, avec une faible variabilité ($P = 0,01$) entre les distances (Tab. XII).

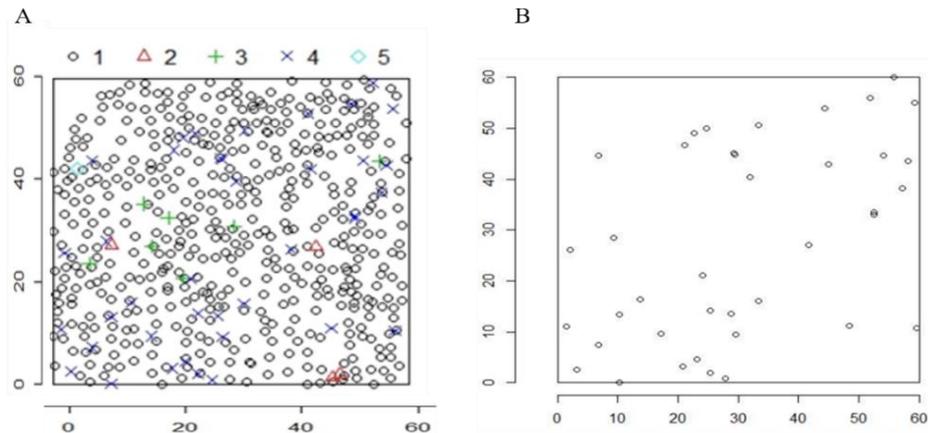


Fig. 28. Cartographie d'un SAFC avec une structure spatiale aléatoire des agrumes.

(A) carte de la parcelle complète et (B) carte de la disposition des agrumes. (1), arbres forestiers (2), autres arbres fruitiers (3), agrumes (4) et palmiers (5).

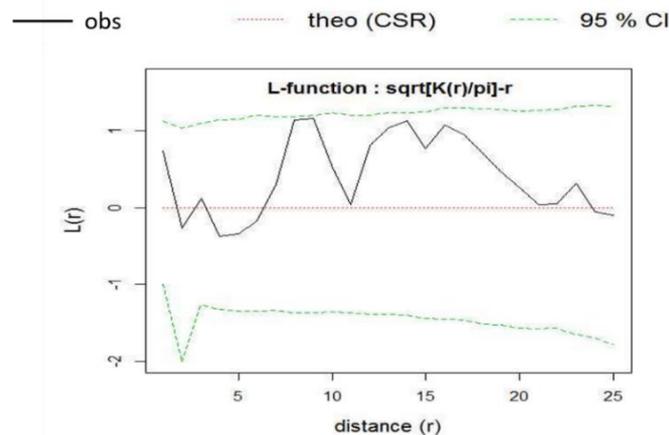


Fig. 29. Fonction $L(r)$ représentant une distribution aléatoire des agrumes dans un SAFC

III.1.2.3.1.3. Structure spatiale agrégée des agrumes dans les SAFC

Dans plus de 30 % des SAFC étudiés, les agrumes ont montré une structure spatiale agrégée. Ce type de structure spatiale est particulièrement prédominant à Bikok où dans 6 des 7 SAFC étudiés, les agrumes ont montré ce type de structure spatiale. Les sites de Bokito, Boumnyebel et Evdoula

ont également montré quelques parcelles avec ce type de structure spatiale. Les structures spatiales agrégées n'ont pas été rencontrées à Muyuka.

La figure 30A illustre un SAFC dans le site de Bikok, dans lequel les agrumes ont une structure spatiale agrégée (Fig. 30B). Cette agrégation de la population des agrumes est confirmée par la courbe de la fonction $L_{(R)} \geq 0$, entre 3 et 13 m avec un dôme entre 7 et 10 m. Ceci montre que dans cette parcelle, les agrumes ont une structure spatiale agrégée, avec des agrégats distants de près de 13 m et de taille variant entre 7 et 10 m (Fig. 31).

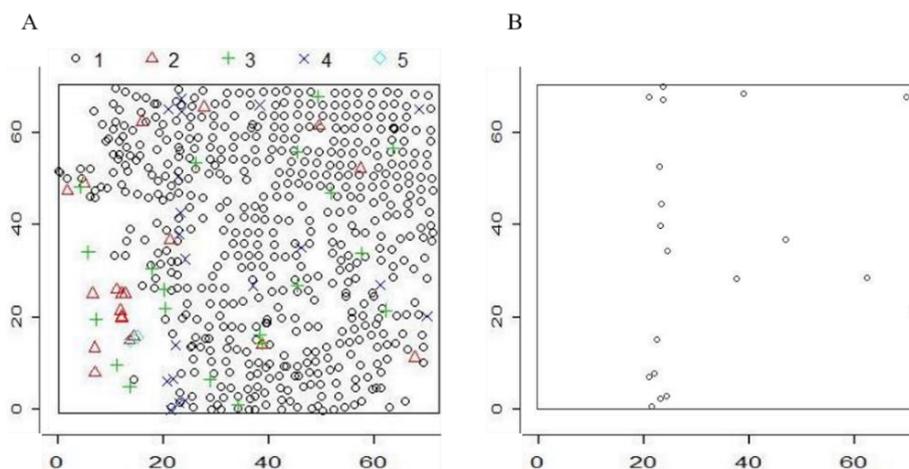


Fig. 30. Cartographie d'un SAFC avec une structure spatiale agrégée des agrumes.

(A) carte de la parcelle complète et (B) carte de la disposition des agrumes. (1), arbres forestiers (2), autres arbres fruitiers (3), agrumes (4) et palmiers (5).

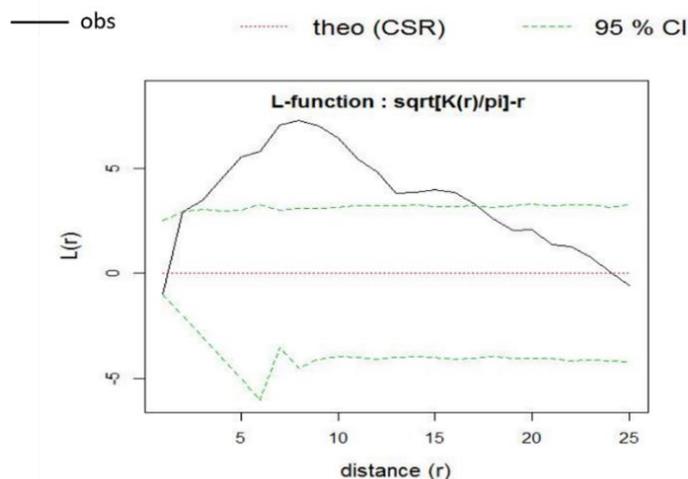


Fig. 31. Fonction $L(r)$ représentant une distribution agrégée des agrumes dans un SAFC

La fonction $L_{(r)}$ dans les SAFC ayant une structure spatiale agrégée varie entre 0,43 et 6,77. On observe une différence hautement significative entre les distances r ; L_{10} et L_{15} présentent les valeurs les plus élevées de $L_{(r)}$, alors que les plus faibles sont observées à L_1 (Tab. XII).

Tab. XII. Valeurs de L(r) caractérisant les différents types de structure spatiale des agrumes

L(r)	Structure spatiale des agrumes			Moyenne total
	Régulière	Aléatoire	Agrégée	
L ₍₁₎ citrus	-1,00±0,00 ^{ab}	-0,91±0,33 ^{ab}	0,43±1,45 ^a	-0,56±0,97 ^a
L ₍₅₎ citrus	-1,96±2,69 ^a	-0,16±1,38 ^{ab}	4,36±1,73 ^{bc}	0,84±2,74 ^{ab}
L ₍₁₀₎ citrus	0,13±0,81 ^{ac}	0,29±1,07 ^b	6,06±2,70 ^{bc}	1,83±3,06 ^b
L ₍₁₅₎ citrus	2,03±0,12 ^{bc}	-0,11±1,80 ^{ab}	6,77±1,38 ^c	1,98±3,41 ^b
L ₍₂₀₎ citrus	2,61±0,88 ^c	-0,69±1,14 ^{ab}	5,54±1,37 ^{bc}	1,36±3,01 ^{ab}
L ₍₂₅₎ citrus	3,05±0,53 ^c	-1,36±1,54 ^a	4,01±1,03 ^b	0,59±2,85 ^{ab}
Anova/Test de Tuckey				
Df	5	5	5	5
F value	8,45	3,506	12,38	2,956
Pr(>F)	0.01 **	0.01 **	0.001 ***	0.05*

Les variables L (1) - L (25) sont liées à la structure spatiale des agrumes. Dans les lignes, les valeurs avec la même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tuckey à $p < 0,05$).

III.1.2.3.3. Interaction structure spatiale des agrumes dans les SAFC et intensité de gommose

L'effet de la structure spatiale a été évalué dans les sites de Bokito, Boumnyebel et Evodoula. En effet, il n'a pas été possible de faire une analyse de variance entre les trois types de structure spatiale dans les sites de Bikok et de Muyuka du fait que, dans le site de Bikok, aucune parcelle ayant des agrumes avec une structure spatiale régulière n'a été trouvée ; de même, aucune parcelle agrégée n'a été trouvée à Muyuka.

Dans les sites de Evodoula et de Boumnyebel, l'analyse de variance a montré une différence hautement significative entre les trois types de structure spatiale ($P = 0.001$ et $P = 0.05$). Les parcelles dans lesquelles les agrumes avaient une structure spatiale agrégée ou aléatoire ont montré une forte intensité de la gommose contrairement à celles dans lesquelles les agrumes avaient une structure spatiale régulière. A Bokito, on observe une différence significative entre les trois types d'organisation spatiale. Les SAFC dans lesquels les agrumes avaient une structure spatiale aléatoire étaient significativement plus malades contrairement à ceux ayant une structure spatiale régulière (Tab. XIII). Il ressort donc de ces observations que, les SAFC dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale agrégée ou aléatoire, sont plus attaqués par la gommose que ceux dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale régulière.

Tab. XIII. Intensité de la gommose selon les types de structure spatiale dans les sites d'étude.

Sites	Intensité de la gommose (Moy. ± Ecart type)			Anova/Tukey test		
	Agrégée	Aléatoire	Régulière	Df	F val.	Pr (>F)
Bokito	0,00±0,00 ^a	19,35±30,58 ^b	18,13±20,46 ^{ab}	2	4,046	<0.05
Boum.	45,16±50,58 ^b	28,97±36,94 ^b	0,62±02,50 ^a	2	6,802	<0.001
Evodoula	76,25±39,22 ^b	57,55±35,57 ^b	33,02±33,77 ^a	2	10,31	<0.001

Dans la même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey à $p < 0,05$).

III.1.2.4. Effet combiné des caractéristiques structurales du système agroforestier et des facteurs climatiques sur IG

A l'aide d'un modèle de régression linéaire à effet mixte, l'effet de la surface terrière (G), de la biodiversité (H'), du nombre d'agrumes dans la parcelle, du nombre d'individus dans la parcelle, du nombre d'arbres d'ombrage, du nombre d'espèces, de la pluviométrie, de l'humidité relative et du taux d'ombrage sur IG sur les agrumes a été testé. Parmi toutes les variables considérées dans l'analyse, les résultats ont montré que, seule la pluviométrie, la température, l'humidité relative et le taux d'ombrage ont un effet significatif sur IG. La température (valeur $z = 3,103$) et l'humidité relative (valeur $z = 4,418$) ont montré des corrélations positives avec IG ; tandis que la pluviométrie (valeur $z = -3,417$) et le taux d'ombrage (valeur $z = -3,285$) ont montré des corrélations négatives (Tab. XIV).

Tab. XIV. Résultats du modèle linéaire généralisé à effets mixtes (GLMM) testant l'effet des bassins de production d'agrumes, du nombre d'individus et de la surface terrière sur IG avec le taux d'ombrage comme effet aléatoire.

Variables		Estimate	Erreur standard	z	Pr (> z)
Intercept		2.204e ⁺⁰⁰	2.048e ⁺⁰⁰	1.076	0.2818
Sites	Bokito	2.942e ⁺⁰⁰	2.034e ⁺⁰⁰	1.447	0.1480
	Boumnyebel	4.159e ⁺⁰⁰	2.018e ⁺⁰⁰	2.061	0.0393 *
	Evoudoula	2.465e ⁺⁰⁰	2.027e ⁺⁰⁰	1.216	0.2238
	Muyuka	1.876e ⁺⁰⁰	1.970e ⁺⁰⁰	0.952	0.3409
Nombre d'individus (NI)		2.848e ⁻⁰³	6.633e ⁻⁰³	0.429	0.6677
G (m ² /ha)		-3.910e ⁻⁰³	2.521e ⁻⁰³	-1.551	0.1209
Site vis NI	Bokito vis NI	-9.430e ⁻⁰³	7.029e ⁻⁰³	-1.341	0.1798
	Boumnyebel vis NI	-1.317e ⁻⁰²	6.739e ⁻⁰³	-1.954	0.0507
	Evoudoula vis NI	-5.655e ⁻⁰³	6.758e ⁻⁰³	-0.837	0.4027
	Muyuka vis NI	-2.774e ⁻⁰³	6.628e ⁻⁰³	-0.419	0.6755
Sites vis G (m ² /ha)	Bokito vis G (m ² /ha)	-1.220e ⁻⁰³	1.311e ⁻⁰³	-0.931	0.3520
	Boumnyebel vis G (m ² /ha)	-2.694e ⁻⁰³	2.256e ⁻⁰³	-1.194	0.2324
	Evoudoula vis G (m ² /ha)	-1.008e ⁻⁰³	1.520e ⁻⁰³	-0.663	0.5072
	Muyuka vis G (m ² /ha)	-3.098e ⁻⁰⁴	1.502e ⁻⁰³	-0.206	0.8366
NI vis G (m ² /ha)		1.943e ⁻⁰⁵	8.364e ⁻⁰⁶	2.323	0.0202 *

SE : erreur standard des estimations des paramètres, z : t-score testant si l'estimation du paramètre est significativement différente de zéro, Pr>|t| : probabilité que le t-score observé soit supérieur à la valeur critique. Codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1'

III.1.2.5. Stratégies paysannes expliquant le choix des structures spatiales des agrumes dans les SAFC

Les résultats présentés ici sont issus d'une enquête qui avait pour objectif de comprendre les raisons de choix des différents types de structure spatiale des agrumes observés dans les SAFC. Après avoir décrit le profil des agriculteurs, leurs aspirations pour le choix des structures spatiales

des agrumes adoptées dans leurs SAFC ont été décrites. Enfin, la structure spatiale des agrumes observés dans leur SAFC a été comparée à celle qu'ils avaient supposé avoir adoptée.

III.1.2.5.1. Description du profil des producteurs d'agrumes dans les SAFC

L'âge des producteurs enquêtés varie entre 20 et 79 ans ; leur ancienneté dans l'activité agricole en général, et de la gestion des cacaoyères est de 24 ans. Plus de 65 % des agriculteurs font l'agriculture comme activité principale. Plus de la moitié des agriculteurs interrogés n'avaient pas de formation professionnelle dans les métiers de l'agriculture mais gèrent leurs exploitations de manière empirique ou encore traditionnelle. La plupart des agriculteurs avaient acquis leurs champs par héritage et les agrumes présents dans leurs SAFC étaient introduits volontairement dans les SAFC par les producteurs (Tab. XV).

Tab. XV. Profil des producteurs d'agrumes interrogés

Variables	Modalités	Proportion des agriculteurs (%)
Âge (années)	Minimum	20
	Moyenne	50
	Maximum	79
Activité principale (%)	Commercial	7,69
	Artisan	11,54
	Agriculteur	65,38
	Autre	15,38
Années dans l'activité (%)	Min.	2
	Moyenne	24
	Max.	49
Formation aux métiers de l'agriculture (%)	Oui	42,31
	Non	57,69
Comment le SAFC est acquis (%)	Création	26,92
	Héritage	65,38
	Leasing	7,69
Nombre moyen d'agrumes par ha		134,62

III.1.2.5.2. Acquis des producteurs sur l'adoption des structures spatiales dans les SAFC

Près de 77 % des producteurs ont déclaré connaître la notion de structure spatiale des agrumes dans leur SAFC, tandis que 23 % ont admis ne pas connaître la structure spatiale des agrumes dans leur SAFC. Parmi ceux qui ont déclaré connaître la structure spatiale adoptée par les agrumes dans leurs SAFC, plus de la moitié d'entre eux (42 %) ont déclaré avoir choisi une structure spatiale régulière ; 19 % ont déclaré des structures agrégées, et seulement 15 % d'entre eux ont déclaré avoir adopté des structures aléatoires. Dans l'ensemble de l'échantillon, 77 % des agriculteurs interrogés ont déclaré connaître l'importance et le type de structure spatiale adoptée par les agrumes dans leur SAFC.

Après l'analyse des structures spatiales réelles, ces déclarations se sont avérées pour la plupart discordantes avec les structures spatiales réellement adoptées dans les SAFC. En effet, les structures spatiales aléatoires sont prédominantes dans 65 % des SAFC. Pour ce type de structure, un taux de coïncidence de 25 % a été constaté. Pour la structure spatiale agrégée, un taux de coïncidence de 28 % est observé dans les SAFC et 33,33% pour les SAFC régulières. Ainsi, dans l'ensemble, on a des taux de coïncidence inférieurs à 50 %. Ce qui prouve une faible maîtrise des structures spatiales adoptées par les agriculteurs (Tab. XVI).

Tab. XVI. Comparaison entre les types de structure spatiale des agrumes déclarés par les producteurs et ceux effectivement adoptés dans les SAFC.

Type de structure spatiale	Structure spatiale réelle (%)	Structure spatiale déclarée (%)	Taux de coïncidence (%)
Agrégée	26,92	19,23	28,57
Aléatoire	61,54	15,38	25
Régulière	11,54	42,31	33,33
Non déclaré	0	23,08	

III.1.2.5.3. Effet des facteurs exogènes dans l'adoption des structures spatiales des agrumes dans les SAFC

Trois facteurs exogènes ont été pris en compte pour expliquer le choix des structures spatiales des agrumes dans les SAFC par les agriculteurs. Ces facteurs comprennent le positionnement des agrumes dans la parcelle, la raison de l'emplacement et la distance entre les agrumes (Tab. XVII). Pour le positionnement des agrumes dans la parcelle, plus de 70 % des agriculteurs les placent n'importe où, ou encore à des endroits précis. Seuls 15 % des agriculteurs les positionnent au niveau des bordures de leurs parcelles.

Tab. XVII. Description des variables exogènes liées à la disposition des agrumes dans les SAFC

Variables	Modalités de semis	Pourcentage (%)
Positionnement des agrumes dans la parcelle	Non déclaré	7,692
	Bordures de la parcelle	15,385
	A des endroits précis	38,462
	N'importe Où	38,462
Raison de l'emplacement des agrumes dans la parcelle	Autres non déclarées	23,077
	Marquer les limites de la parcelle	26,923
	Remplacer les arbres morts	34,615
	Uniformiser l'ombrage	15,385
Distanciation des agrumes	Aléatoirement	7,692
	Autres	11,538
	Distants	57,692
	Proches	23,077

Pour les raisons de l'emplacement des agrumes dans les SAFC, près de 35 % des agriculteurs mettent les agrumes pour remplacer les arbres morts ; 27 % pour marquer les limites entre les

parcelles et seuls 15 % justifient l'emplacement des agrumes par l'uniformisation de l'ombrage. La majorité des agriculteurs, dont plus 57 % déclarent planter les agrumes distants. Cependant, 23 % disent préférer les planter à de faibles écartements.

La figure 32 ci-dessus illustre les relations entre les facteurs exogènes et le type de structure spatiale des agrumes dans les SAFC. Ainsi, les structures spatiales aléatoires sont corrélées avec la distanciation aléatoire des agrumes, le remplacement des arbres morts et le fait de planter les arbres à des endroits non spécifiques dans la parcelle. Les structures spatiales agrégées quant à elles sont corrélées au fait de planter les agrumes à de faibles écartements, ou encore le fait de planter au niveau des bordures pour limiter les parcelles. Enfin, les structures spatiales régulières résultent du fait de planter les agrumes avec de grands écartements, à des endroits précis et dans l'objectif d'uniformiser l'ombrage dans la parcelle.

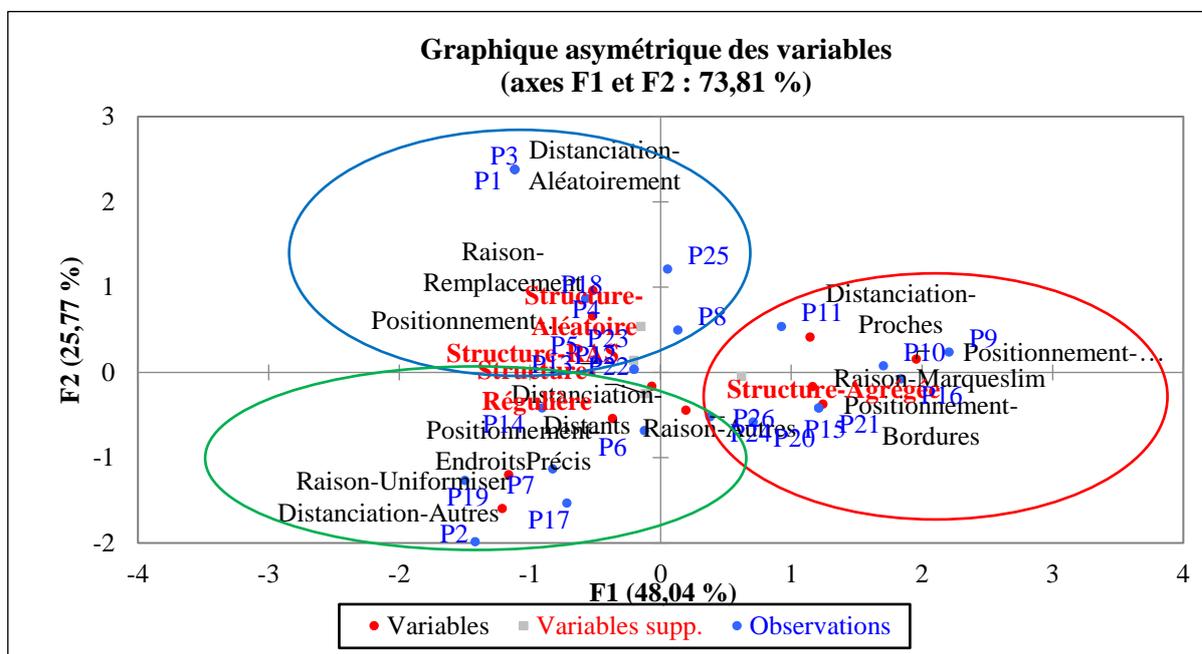


Fig. 32. Relation entre les facteurs exogènes et le type de structure spatiale des agrumes dans les SAFC

III.1.2.5.4. Facteurs endogènes déterminant l'adoption des structures spatiales des agrumes dans les SAFC

Les cinq variables, donc le nombre de cacaoyers, d'agrumes, d'arbres forestiers, d'autres arbres fruitiers et la biodiversité ; utilisées pour l'Analyse en Composantes Principales ont été retenues dans le modèle et le pourcentage de variabilité représenté sur les deux premières variables (F1 et F2) est de 70,59 %. La matrice de corrélation de Pearson ($\alpha = 0,05$) montre une corrélation négative significative ($r = -0,729$) entre le nombre de cacaoyers et l'indice de biodiversité d'une part, et une corrélation positive significative ($r = 0,706$). L'indice de biodiversité et le nombre d'arbres forestiers sont significativement corrélés et ce, de manière positive. Ces deux premières variables

sont faiblement corrélées avec le nombre d'agrumes et le nombre d'arbres fruitiers. Elles sont significativement non corrélées, et négativement avec le nombre de cacaoyers.

Les SAFC dans le cercle vert sont ceux dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale aléatoire. Parmi ceux-ci, P14, P5 et P11 sont des SAFC dans lesquels la densité de cacaoyers est très élevée. Un autre groupe formé par P6, P3 et P2, qui sont des SAFC dans lesquels est noté non seulement une densité importante de cacaoyers, mais aussi un nombre très élevé d'agrumes. Ces SAFC sont donc corrélés avec la variable agrume. Ainsi, la structure spatiale aléatoire des agrumes pourrait être expliquée par la forte densité de cacaoyers d'une part, et la forte densité d'agrumes dans les SAFC d'autre part.

Les SAFC en bleu sont ceux dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale agrégée. Ces SAFC sont plus ou moins corrélés avec l'indice de biodiversité et le nombre d'arbres forestiers dans la SAFC. P20 et P23 sont fortement corrélés avec le nombre d'arbres fruitiers. P19 et P26 sont fortement corrélés avec le nombre d'arbres forestiers, qui est déterminant dans ce cas pour la biodiversité dans le SAFC. Ceci explique également la corrélation observée entre ces SAFC et H'. L'agrégation des agrumes dans les exploitations pourrait donc s'expliquer par le regroupement d'arbres fruitiers de la même espèce (ou du même genre) à des endroits spécifiques dans l'exploitation. Elle pourrait également s'expliquer par l'introduction d'agrumes dans les zones du SAFC où il y a peu d'arbres forestiers, afin de fournir de l'ombre aux cacaoyers. Les SAFC dans lesquels les agrumes ont une structure spatiale régulière (P4, P1 et P21) sont liés au centre du graphique, ce qui limite l'interprétation de leur tendance (Fig. 33).

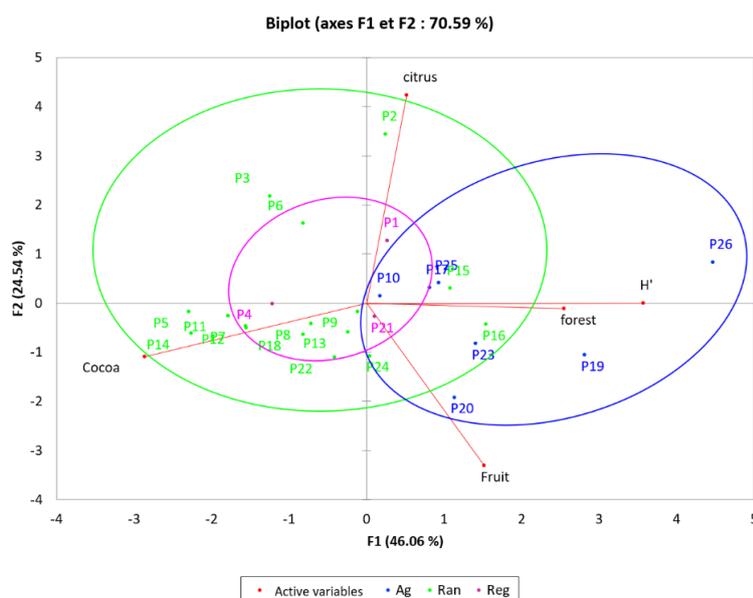


Fig. 33. Principaux facteurs déterminant l'adoption de la structure spatiale des agrumes dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

III.1.3. Effet des facteurs environnementaux et agronomiques sur IG

III.1.3.1. Sélection des variables explicatives en lien avec les variables à expliquer par la régression linéaire multiple

Comme premier tamis, l'analyse de régression linéaire multiple a permis de sélectionner parmi les 39 variables explicatives de départ, celles montrant une significativité vis-à-vis de IG sur chaque espèce d'agrumes. Le tableau 18 ci-dessous montre que, de manière générale, 24 variables explicatives se sont avérées significatives pour expliquer IG. Ce nombre de variables explicatives varie cependant selon les espèces d'agrumes. Sur pomélos, seules 20 variables explicatives sont significatives tandis que sur mandariniers et orangers, 21 variables explicatives le sont. Pour les trois espèces d'agrumes étudiées, toutes les variables climatiques entre autres, la pluviométrie, la température, l'humidité relative et l'humidité du sol sont significativement corrélées avec IG. Sept variables pédologiques à l'occurrence, l'argile, les limons fin et grossier, le sable fin et grossier la matière organique et pH, sont variablement corrélées à l'intensité de la maladie sur les trois espèces d'agrumes. Ainsi, sur pomélo, la matière organique n'est pas corrélée à IG ; tandis que le pH du sol ne l'est pas sur mandariniers et sur orangers.

Douze variables agronomiques sont significativement corrélées à IG. Toutes les cinq variables liées au système de production des agrumes sont significativement corrélées à IG sur toutes les espèces d'agrumes. L'âge des agrumes est également important pour expliquer IG. Les agrumes d'âge moyen (10 et 20 ans) sont significativement corrélés avec IG pour les trois espèces d'agrumes. Les jeunes agrumes, dont l'âge est inférieur à 10 ans montrent des corrélations significatives sur mandariniers et orangers, tandis que ceux les plus âgés (âge supérieur à 20 ans) sont significativement corrélés à IG uniquement sur pomélos. Le type de plant a également montré des corrélations significatives vis-à-vis de IG sur les agrumes. Les plants de semis direct sont significativement corrélés à IG sur orangers et mandariniers, tandis que les plants greffés le sont uniquement sur pomélos. Enfin, les traitements à base de fongicides ou d'insecticides sont significativement corrélés avec IG sur les trois espèces d'agrumes, tandis que les traitements mixtes le sont uniquement sur mandariniers et orangers.

Tableau 18. Résultats de l'analyse de régression linéaire multiple permettant la sélection des variables explicatives en lien avec la variable à expliquer sur les espèces d'agrumes

Variables	Pomelos		Mandariniers		Orangers	
	Estimate	Std error	Estimate	Std error	Estimate	Std error
(Intercept)	-1.024e ⁻⁰²	1.354e ⁻⁰¹	-522.22	679.95	453.26	373.22
Pluviométrie	2.467e ⁺⁰¹	2.170e ⁺⁰¹	-0.25	0.14	-0.02	0.07
Température	2.819e ⁺⁰⁰	7.054e ⁺⁰⁰	61.09	23.34	4.15	12.81
Humidité relative	-1.297e ⁺⁰¹	2.883e ⁺⁰¹	18.00	7.58	4.69	4.16
Humidité du sol	2.309e ⁻⁰¹	1.025e ⁺⁰¹	39.30	31.02	11.84	17.02
Argile	-3.787e ⁺⁰¹	4.272e ⁺⁰¹	-19.44	11.02	-4.40	6.05

Limon fin	-2.239e ⁺⁰¹	1.709e ⁺⁰¹	26.46	45.96	3.92	25.22
Limon grossier	1.121e ⁺⁰²	1.901e ⁺⁰²	-19.66	18.38	-26.84	10.09
Sable fin	1.016e ⁺⁰¹	2.563e ⁺⁰¹	-229.45	204.55	-70.77	112.27
Sable grossier	4.278e ⁺⁰¹	5.714e ⁺⁰¹	-41.76	27.57	-16.23	15.13
Matière organique	NA	NA	-49.48	61.47	-10.74	33.74
pH	3.007e ⁻⁰¹	5.108e ⁻⁰¹	NA	NA	NA	NA
Verger ass. fruitiers	6.676e ⁻⁰¹	6.594e ⁻⁰¹	-0.49	0.54	-0.29	0.30
SAFC	5.357e ⁻⁰¹	4.934e ⁻⁰¹	-0.13	0.70	-0.45	0.38
Jardin de case	2.638e ⁻⁰¹	2.997e ⁻⁰¹	0.14	0.53	-0.14	0.29
Verger pur	5.567e ⁻⁰¹	5.405e ⁻⁰¹	0.01	0.32	0.02	0.17
Verger ass. Cult. annuelles	-5.322e ⁻⁰¹	4.273e ⁻⁰¹	-0.23	0.58	-0.28	0.31
Age [10-20] ans	-6.860e ⁻⁰¹	5.855e ⁻⁰¹	-0.04	0.45	0.04	0.25
Age ≤ 10 ans	NA	NA	-0.98	0.63	-0.10	0.34
Age ≥ 20 ans	-1.196e ⁻⁰¹	4.574e ⁻⁰¹	NA	NA	NA	NA
Plants de semi	NA	NA	0.32	0.49	0.52	0.27
Plants greffés	2.059e ⁻⁰¹	4.170e ⁻⁰¹	NA	NA	NA	NA
Fongicide	2.813e ⁻⁰¹	4.995e ⁻⁰¹	-0.49	0.44	-0.49	0.24
Insecticide	-4.983e ⁻⁰²	2.167e ⁻⁰¹	0.86	0.53	0.12	0.29
Traitements mixtes	NA	NA	-0.14	0.23	-0.02	0.12

III.1.3.2. Deuxième tamis : sélection à l'aide de scores des VIP

Après la sélection des variables par l'analyse de régression linéaire multiple, les scores des variables importantes pour la projection (VIP) ont permis de détecter les variables déterminant IG sur les trois espèces d'agrumes. Cette sélection a été faite à partir des 24 variables retenues après le premier tamis. Le tableau 19 ci-dessous montre les détails numériques des scores des VIP pour les trois espèces d'agrumes. Il ressort ici que huit variables ont montré des scores de $VIP \geq 1$ en moyenne. Il s'agit des quatre variables climatiques, entre autres l'humidité du sol (1,64), l'humidité relative (1,37), la température (1,17) et la pluviométrie (1,12). Trois variables pédologiques ont également montré un score de VIP moyen ≥ 1 . Il s'agit de l'argile (1,17), de la matière organique (1,09) et du limon fin (1,07). Enfin, pour les variables agronomiques, seul le verger associé aux autres arbres fruitiers a montré un score de $VIP \geq 1$, avec une valeur de 1,02.

En dehors de ces huit variables, 13 autres variables ont été retenues par le modèle, mais celles-ci montrent un score de $VIP \leq 1$ en moyenne. Par ailleurs, bien que certaines variables montrent un score de VIP moyen ≤ 1 , elles montrent des valeurs de score de VIP bien ≥ 1 pour au moins une espèce d'agrumes. Ainsi sur pomélo, l'âge des agrumes compris entre 10 et 20 ans, le limon grossier et le traitement phytosanitaire mixte montrent des scores de VIP de 1,50, 1,44 et 1,10 respectivement. Sur mandariniers, les agrumes âgés de 10 à 20 ans, les traitements phytosanitaires à base d'insecticides, le système de production dans les jardins de case et les traitements phytosanitaires à base de fongicides montrent des scores de VIP de 1,28, 1,08, 1,24 et 1,03 respectivement. Sur oranger, seul la variable « traitements insecticides » a montré un score de VIP de 1,04.

Tableau 19. Score des variables importantes dans la projection en relation avec IG sur les différentes espèces d'agrumes

Variables	VIP Scores			Moyennes
	Pomelos	Mandariniers	Orangers	
Humidité du sol	0,92	1,38	2,64	1,64
Humidité relative	1,31	1,29	1,52	1,37
Température	1,04	0,68	1,80	1,17
Argile	1,78	0,50	1,21	1,17
Pluviométrie	0,99	1,08	1,29	1,12
Matière organique	1,23	1,35	0,69	1,09
Limon fin	1,19	1,36	0,64	1,07
Verger ass. Fruitiers	1,02	1,70	0,32	1,02
Âge [10-20]ans	1,50	1,28	0,06	0,94
Insecticide	0,60	1,08	1,04	0,90
Limon_grossier	1,44	0,82	0,40	0,89
Traitements mixtes	1,10	0,59	0,66	0,78
Jardin_de_case	0,64	1,24	0,41	0,76
Semi_direct	0,61	0,61	0,83	0,68
Fongicide	0,23	1,03	0,73	0,66
Sable grossier	0,87	0,61	0,40	0,63
Verger_pur	0,69	0,75	0,32	0,59
Verger ass. Cult. annuelles	0,54	0,23	0,74	0,50
Sable fin	0,43	0,79	0,26	0,50
Âge -10 ans	0,62	0,48	0,32	0,47
SAFC	0,42	0,38	0,43	0,41

III.1.3.3. Principales variables déterminant IG sur les espèces d'agrumes

La carte thermique des corrélations entre IG et les variables explicatives (Fig. 36) a permis de mettre en évidence les principaux facteurs de risque épidémiologiques de la gommose pour chaque espèce d'agrumes. De manière globale, la carte thermique montre que, IG sur pomélo et mandarinier se comporte similairement vis-à-vis des variables explicatives, contrairement aux orangers. En s'intéressant aux variables explicatives, les 20 variables retenues ont été réparties en cinq groupes. Le groupe 1 est composé de trois variables (humidité du sol, humidité relative et pluviométrie), le groupe 2 en est composé de 10 (traitement mixtes, traitement à base d'insecticide, le sable grossier, l'argile, le verger associé aux autres fruitiers, l'âge compris entre 10 et 20 ans, le verger associés aux cultures annuelles, le traitement à base de fongicides, le limon grossier et le verger pur), le groupe 3 en est composé de deux (le sable fin et la température), le groupe 4 est composé de deux variables (le SAFC et les plants de semis) et enfin le groupe 5 qui est composé de trois variables (le jardin de case, la matière organique et le limon fin). Ces variables affectent de manière différentes IG sur les trois espèces d'agrumes.

Sur pomélos, en dehors des variables du groupe 5, la plupart des variables sont très faiblement corrélées à IG et de manière positive. Par ailleurs, l'argile est corrélée négativement à l'intensité

de la maladie. Sur mandariniers, le comportement des variables explicatives est assez similaire à celui observé sur pomélos. Sur oranger, on observe des coefficients de corrélation hautement significatifs. Toutes les variables du groupe 1 en plus de quatre variables du groupe 2 sont très significativement corrélées et de manière positive, à IG. La température et le limon fin montrent également des coefficients de corrélation très significatifs mais négativement corrélés à IG.

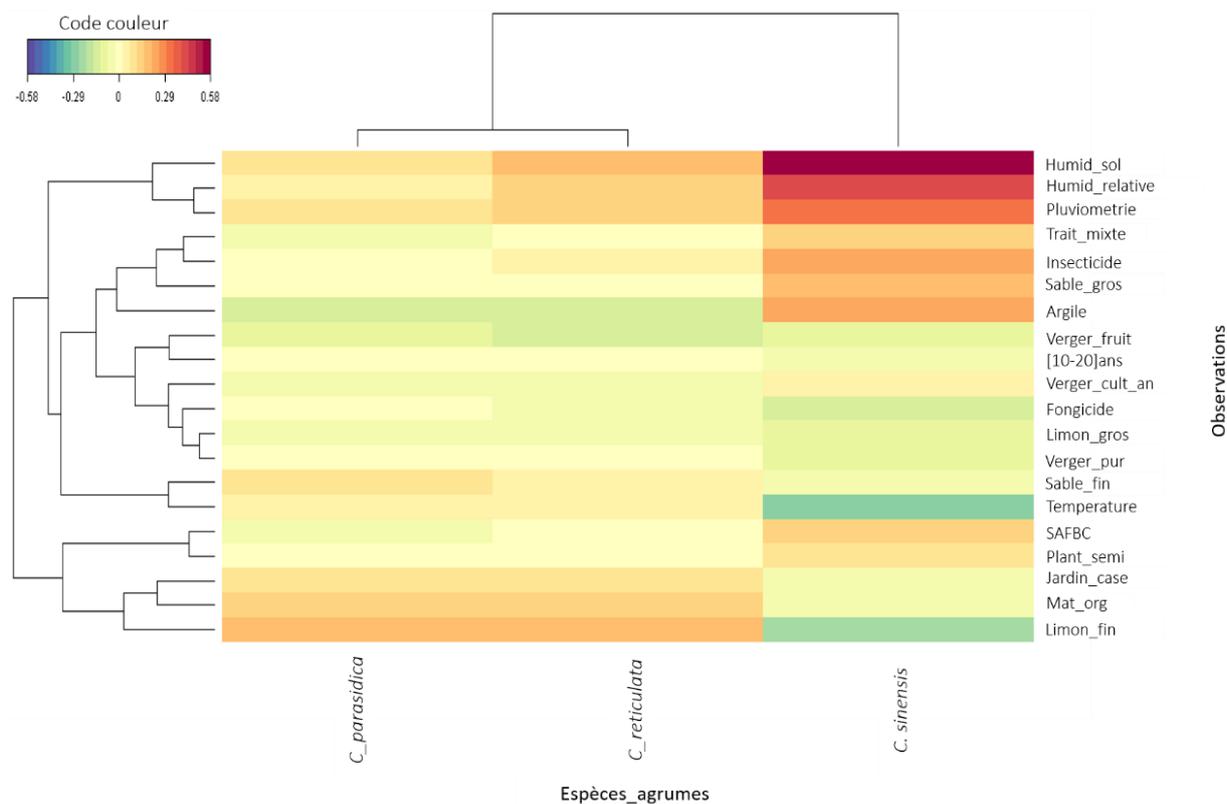


Figure 34. Sélection graphique des variables explicatives à l'aide d'une carte thermique de corrélation

La mise en évidence des principales variables qui déterminent IG sur les espèces d'agrumes est illustrée à l'aide de la représentation en réseau des variable prédictives finales sur la figure 35 ci-dessous. Celle-ci illustre le troisième et dernier tamis effectué pour retenir les principaux facteurs de risque épidémiologique selon les espèces d'agrumes. Il ressort de cette analyse que seules sept variables permettent d'expliquer IG sur les espèces d'agrumes. Il s'agit de l'humidité du sol, la pluviométrie, l'humidité relative, le taux d'argile dans le sol, la température, le limon fin et le traitement à l'aide d'insecticides. Sur les orangers, toutes ces variables sont déterminantes pour expliquer IG. L'humidité du sol, la pluviométrie et l'humidité relative sont très fortement corrélés à IG et de manière positive. La température quant à elle est négativement corrélée à l'IG sur orangers. Sur mandariniers, seule l'humidité du sol est déterminante pour expliquer IG. Cependant, cette variable est faiblement corrélée à l'intensité de la maladie et de manière positive. Sur les pomélos, le limon fin est la seule variable qui explique IG. Cette variable montre également une corrélation faible mais positive.

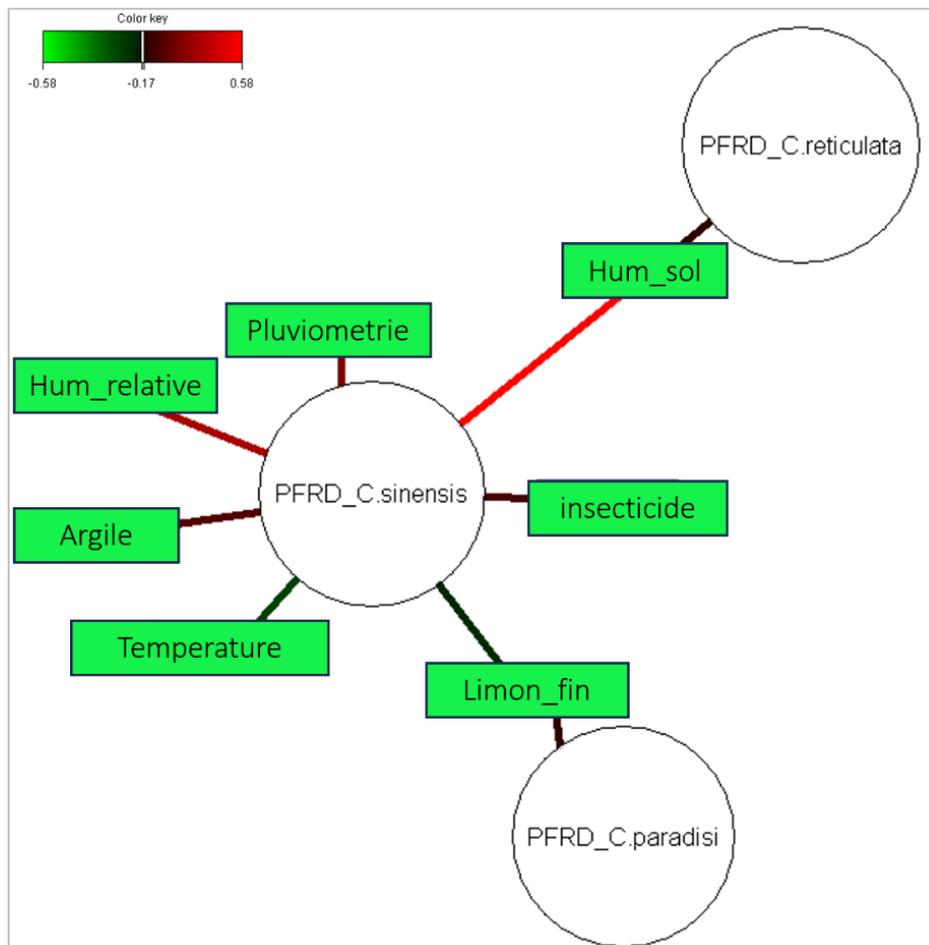


Figure 35. Représentation en réseau par la régression par les moindres carrés partiels de IG en relation avec les espèces d'agrumes sur les variables prédictives.

Les corrélations positives (rouge) et négatives (vert) avec les critères de la dynamique.

III.1.3.4. Interaction entre les variables explicatives et les espèces de *Phytophthora* responsables de la gommose

L'effet des variables explicatives sur les espèces de *Phytophthora* responsables de la gommose sur les agrumes a été déterminé par une sélection graphique à l'aide d'une carte thermique de corrélation (Fig. 36). Du point de vue des espèces de *Phytophthora*, bien qu'il y ait des dissemblances entre elles, trois groupes ont été formés. *P. nicotianae* et *P. citrophthora* forment des groupes distincts ; tandis que *P. cinnamomi* et *P. palmivora* forment un groupe à part entière.

Une corrélation hautement significative et positive est mise en évidence entre *P. nicotianae* et la pluviométrie, l'humidité du sol et l'humidité relative. D'autres variables telles que le jardin de case, le sable fin et la température montrent également des corrélations significative et positives avec cette espèce de *Phytophthora*. Par contre, la matière organique et le SAFC montrent des corrélations significatives mais négatives. Avec *P. citrophthora*, seule l'argile a montré une

corrélation significative et positive. Par contre le limon fin, le jardin de case, le sable fin, la pluviométrie et l'humidité relative ont montré des corrélations significatives mais négatives.

Dans le cas de *P. palmivora*, on observe une corrélation hautement significative et positive avec la pluviométrie, l'humidité du sol et l'humidité relative. Le jardin de case, le sable fin et la température montrent également des corrélations significatives et positives. Par contre, seule la matière organique et le SAFC montrent des corrélations significatives et négatives. Pour *P. cinnamomi*, la matière organique et le limon fin montrent des corrélations significatives et positives. La pluviométrie, l'humidité du sol et l'humidité relative montre des corrélations significatives mais négatives.

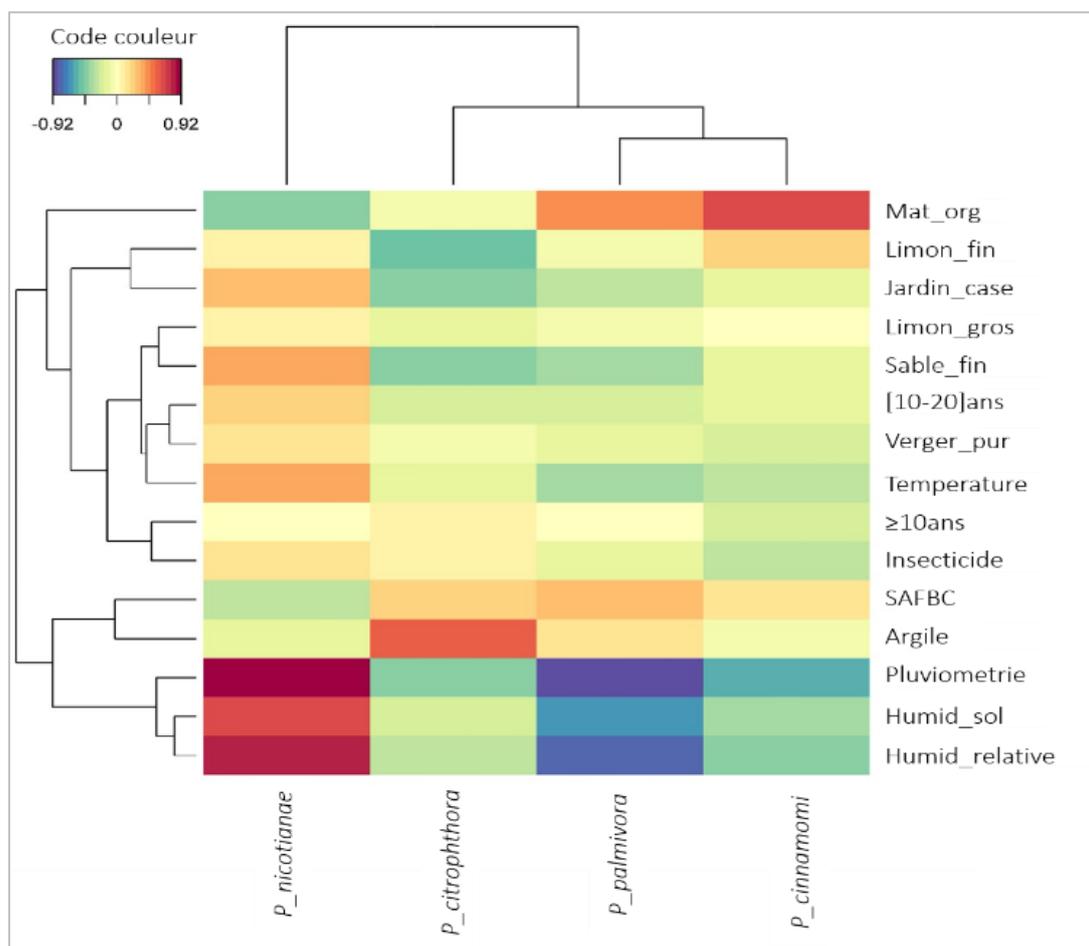


Figure 36. Sélection graphique à l'aide d'une carte thermique de corrélation

La représentation en réseau par la régression par moindres carrés partiels de IG en relation avec les agents pathogènes sur les variables prédictives, montrant les corrélations avec les critères de la dynamique a permis de mettre en évidence les principaux facteurs de risque épidémiologique. Pour *P. citrophthora*, cinq variables déterminent IG sur les agrumes. Il s'agit de la pluviométrie, du sable grossier, de l'argile, du limon fin et du jardin de case. Pour cet agent pathogène, ces corrélations sont significatives mais peu orientées. Cependant, seul l'argile montre une corrélation

significative et positive. Seules deux variables sont corrélées avec *P. cinnamomi*. Il s'agit de la matière organique et la pluviométrie. La première variable est positivement corrélée à cet agent pathogène, tandis que la deuxième l'est négativement.

P. palmivora est corrélée avec cinq variables. Il s'agit de l'humidité relative, de la matière organique, de la pluviométrie, du sable grossier et de l'humidité du sol. La matière organique et le sable grossier montrent des corrélations faiblement significatives. La pluviométrie, l'humidité relative et l'humidité du sol sont positivement et significativement corrélés avec cet agent pathogène.

P. nicotianae est corrélée avec six variables. Il s'agit de l'humidité relative, la matière organique, la pluviométrie, le sable grossier, l'humidité du sol et la température. La pluviométrie, l'humidité relative et l'humidité du sol sont significativement et positivement corrélées avec cet agent pathogène ; tandis que la matière organique et le sable grossier sont très peu significativement corrélés audit agent pathogène.

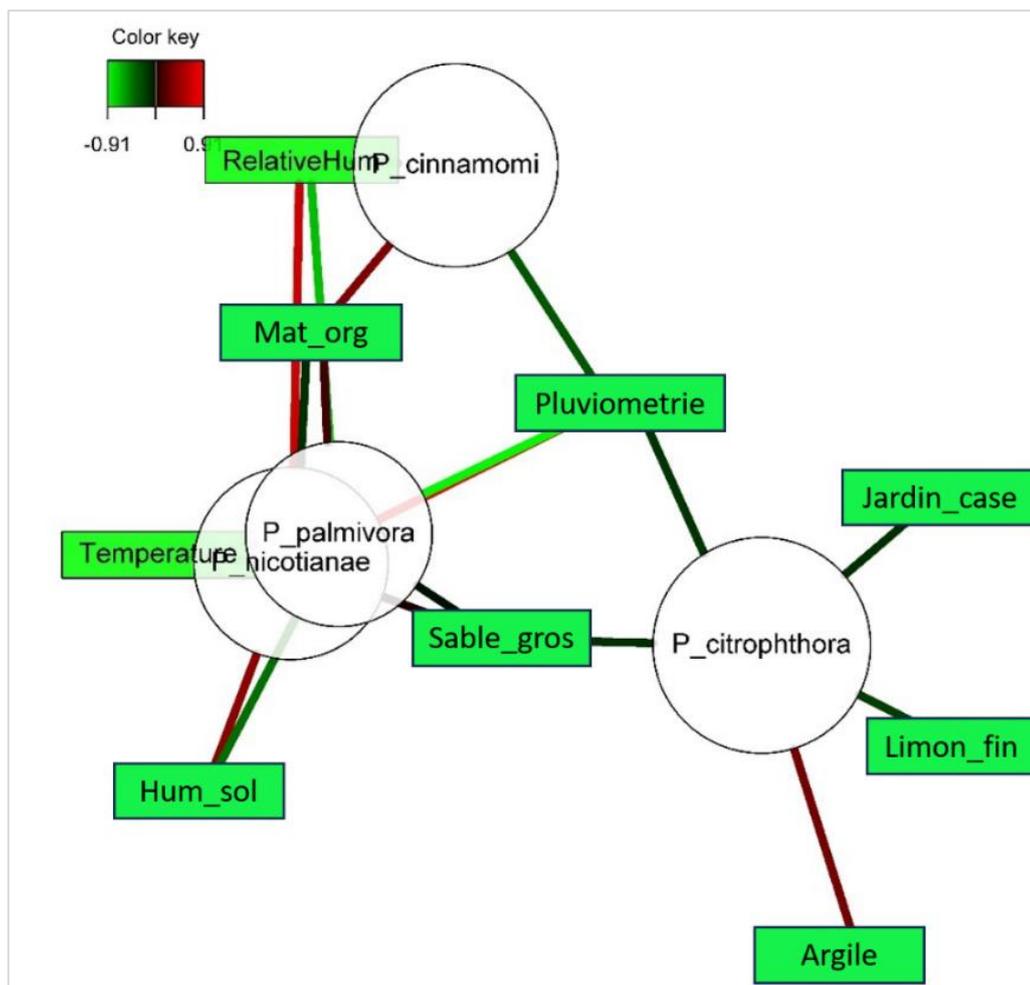


Figure 37. Représentation en réseau par la régression par moindres carrés partiels de IG en relation avec les agents pathogènes sur les variables prédictives, montrant les corrélations positives (rouge) et négatives (vert) avec les critères de la dynamique.

III.1.4. Activité antifongique *in vitro* de deux agents de lutte biologique sur les *Phytophthora* inféodés aux agrumes

III.1.4.1. Effet de *Trichoderma asperellum* sur les *Phytophthora* spp. inféodés aux agrumes

III.1.4.1.1. Effet de *T. asperellum* sur la croissance de *Phytophthora*

L'effet inhibiteur des souches de PR11 et PR12 de *T. asperellum* sur les quatre espèces de *Phytophthora* est illustré par la figure 38. Chez certaines espèces de *Phytophthora*, un ralentissement de la croissance mycélienne est observé en présence de l'antagoniste ; tandis que chez d'autres, une zone d'inhibition claire est observée.

On observe que la croissance mycélienne des souches témoins pour les quatre espèces de *Phytophthora* est largement supérieure à celle des différentes confrontations entre les souches de *T. asperellum* et chaque espèce de *Phytophthora* (Fig. 39). Une croissance rapide est observée pour *P. cinnamomi*, *P. nicotianae* et *P. palmivora* ; tandis que *P. citrophthora* montre une croissance plutôt lente.

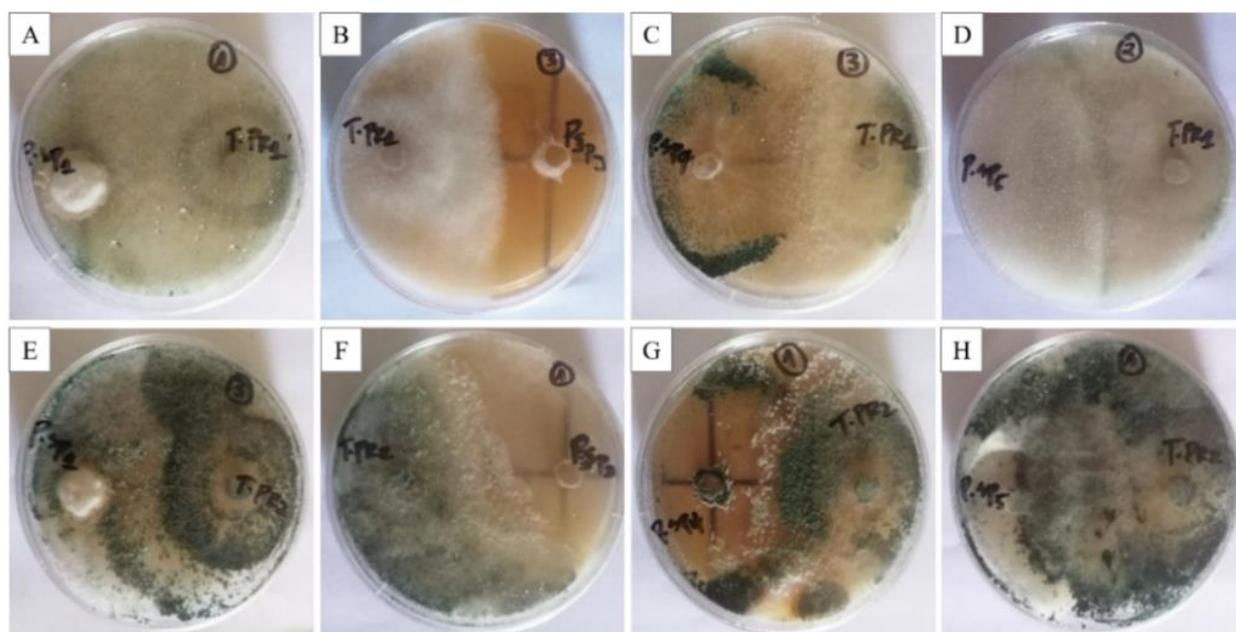


Fig. 38. Effet antagoniste des souches *Trichoderma asperellum* PR11 sur les *Phytophthora* spp. inféodées aux agrumes

T. asperellum PR11 vis-à-vis de (A) *P. citrophthora*, (B) *P. nicotianae* (C) *P. palmivora* et (D) *P. cinnamomi* ; *T. asperellum* PR12 vis-à-vis de (E) *Phytophthora citrophthora*, (F) *P. nicotianae* (G) *P. palmivora* et (H) *P. cinnamomi*.

La figure 39 ci-dessous montre la croissance radiale des *Phytophthora* spp. en présence des souches de *T. asperellum* PR11 et PR12 sur milieu PDA. A partir du deuxième jour, on a observé une croissance très rapide des témoins de *P. cinnamomi*, *P. nicotianae* et *P. palmivora*, jusqu'à

leur maximum de croissance. C'est également au deuxième jour qu'on a observé pour ces trois agents pathogènes, une réduction progressive de leur croissance lorsqu'ils sont en présence des souches antagonistes. *P. citrophthora* a montré une croissance lente et l'effet des souches antagonistes a également été atténué et ce n'est qu'au sixième jour qu'une démarcation claire entre les traitements antagonistes et le contrôle a été observée. Ces résultats mettent en évidence l'action inhibitrice des deux souches de *T. asperellum* (T-PR11 et T-PR12) utilisées dans cette étude vis-à-vis des espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes.

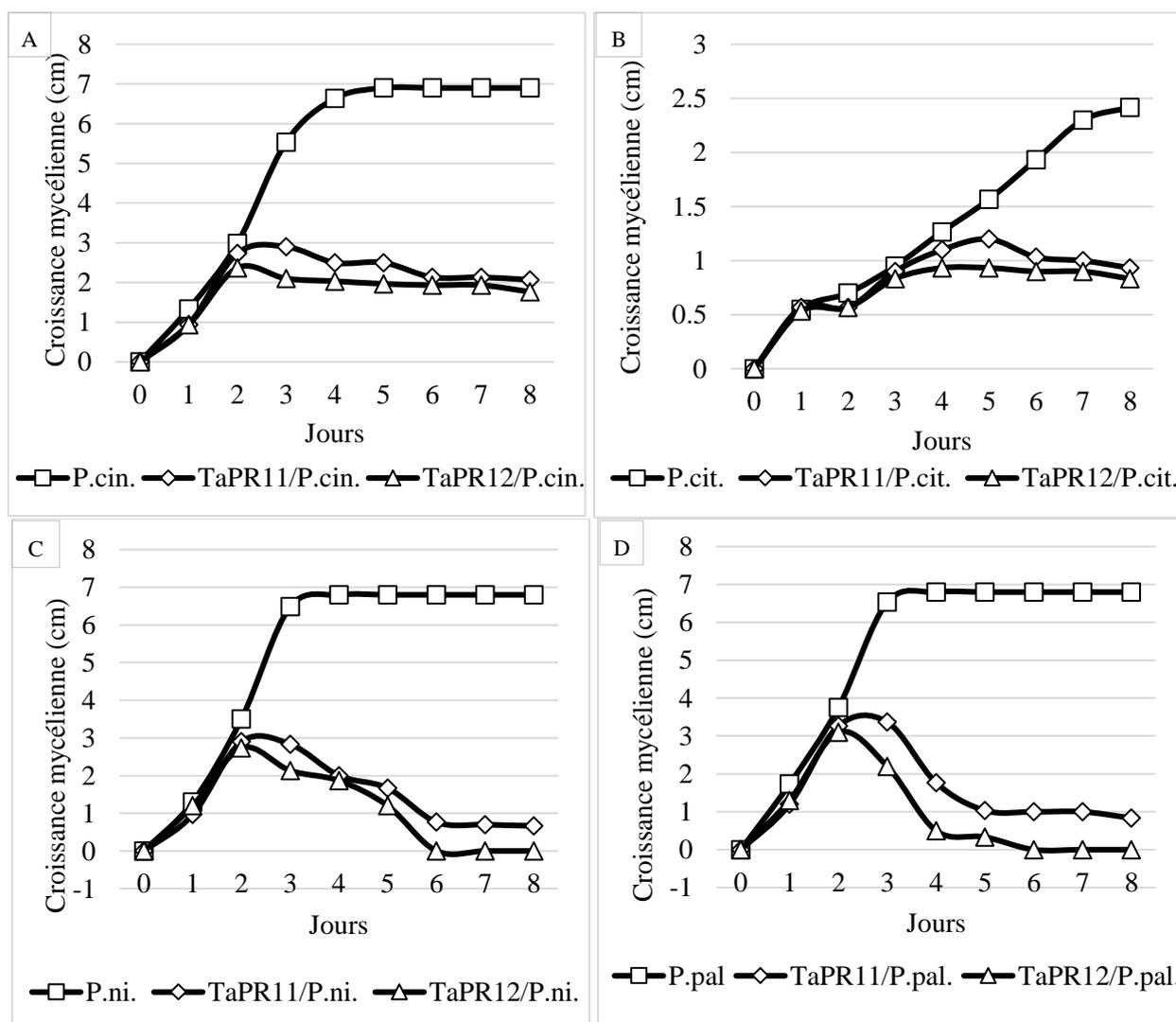


Fig. 39. Effet inhibiteur de *Trichoderma asperellum* contre *Phytophthora* spp. *Phytophthora cinnamomi* (A), *P. citrophthora* (B), *P. nicotianae* (C) et *P. palmivora* (D).

III.1.4.1.2. Efficacité de *T. asperellum* à inhiber la croissance de *Phytophthora* spp.

Les résultats du test bio-fongicide des souches de *T. asperellum* sur les espèces de *Phytophthora* montrent que la colonisation du mycélium parasite par les souches antagonistes varie différemment entre les souches PR11 et PR12, ainsi qu'entre les quatre espèces de *Phytophthora*. Ce résultat est

confirmé par le taux d'inhibition observée pour les deux souches (Tab. XXI). Une différence hautement significative ($P=0,001$) du taux d'inhibition a été observé entre les traitements. *P. citrophthora* et *P. palmivora* sont les deux espèces de *Phytophthora* les plus sensibles vis-à-vis des souches de *T. asperellum*.

Tab. XX. Efficacité de *Trichoderma asperellum* PR11 et PR12 vis-à-vis de *Phytophthora* spp.

Souches de <i>T. asperellum</i>	<i>Phytophthora</i> spp.	Efficacité (%)
<i>T. asperellum</i> PR11	<i>P. nicotianae</i>	28,908±23,601 ^a
	<i>P. citrophthora</i>	63,891±28,480 ^c
	<i>P. palmivora</i>	62,485±31,252 ^c
	<i>P. cinnamomi</i>	52,992±21,027 ^{ac}
<i>T. asperellum</i> PR12	<i>P. nicotianae</i>	33,705±23,966 ^{ab}
	<i>P. citrophthora</i>	69,309±33,916 ^c
	<i>P. palmivora</i>	75,392±33,704 ^c
	<i>P. cinnamomi</i>	58,092±22,842 ^{cb}
Anova/Test de Tukey		
Df		9
F value		6,867
Pr (>F)		<0.001

III.1.4.1.3. Mycoparasitisme et propriété fongistatique/fongicide de *Trichoderma asperellum* sur *Phytophthora*

L'effet fongistatique a été observé avec les deux souches *T. asperellum* PR11 et PR12. *T. asperellum* PR11 a montré un effet fongistatique sur *P. cinnamomi* ; et *T. asperellum* PR12 l'a montré sur *P. palmivora*. Seule la souche PR12 de *T. asperellum* a montré un effet fongicide sur *P. nicotianae*, *P. palmivora* et *P. cinnamomi*.

Les observations microscopiques des différentes structures résultant du mycoparasitisme entre les souches de *T. asperellum* et les agents pathogènes ont permis d'observer l'invasion du milieu par les conidies de l'antagoniste et l'enroulement du mycélium de l'agent pathogène par l'antagoniste (Fig. 40). Le mycoparasitisme implique des changements morphologiques tels que l'enroulement et la création de structures de type appressorium qui permettent au mycoparasite de s'infiltrer dans l'hôte et de contenir de fortes concentrations de solutés osmotiques comme le glycérol.

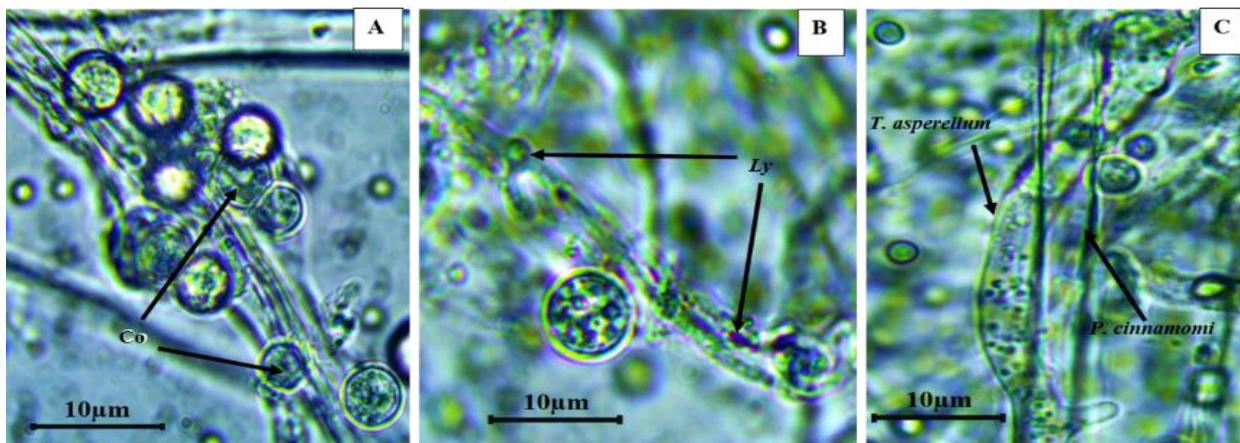


Fig. 40. Interaction entre hyphes de *Phytophthora citrophthora* et mycoparasitisme des souches de *Trichoderma asperellum*.

(A) Conidies de *T. asperellum* entourant et lysant le mycélium de l'agent pathogène ; (B) lyse du mycélium de *P. cinnamomi* ; (C) enroulement des hyphes massif de *T. asperellum* autour de *P. cinnamomi*. Co : conidies ; Ly : lyse.

III.1.4.2. Effet fongicide des AgNP de *Tithonia diversifolia* sur les *Phytophthora* spp. inféodés aux agrumes

III.1.4.2.1. Caractérisation de l'AgNP

La spectroscopie UV-Vis a été réalisée pour confirmer la formation des nanoparticules en solution aqueuse. Le AgNO_3 a été converti en nanoparticules de nitrate d'argent lorsque le l'extrait aqueux de *T. diversifolia* a été ajouté dans la solution. La formation des nanoparticules de nitrate d'argent a été confirmée visuellement lorsque la couleur de la solution est passée du verdâtre au brun rougeâtre après quelques minutes et la réduction complète de Ag^+ en Ag^0 a été obtenue en 5 minutes (Fig. 41A). Le pic d'absorption des AgNPs se situe entre 385 et 600 nm avec un pic proéminent à 426 nm comme le montre la figure 42B. La formation de AgNPs de petite taille et de forme régulière est indiquée par la bande de résonance plasmodique de surface (SPR) à 426 nm.

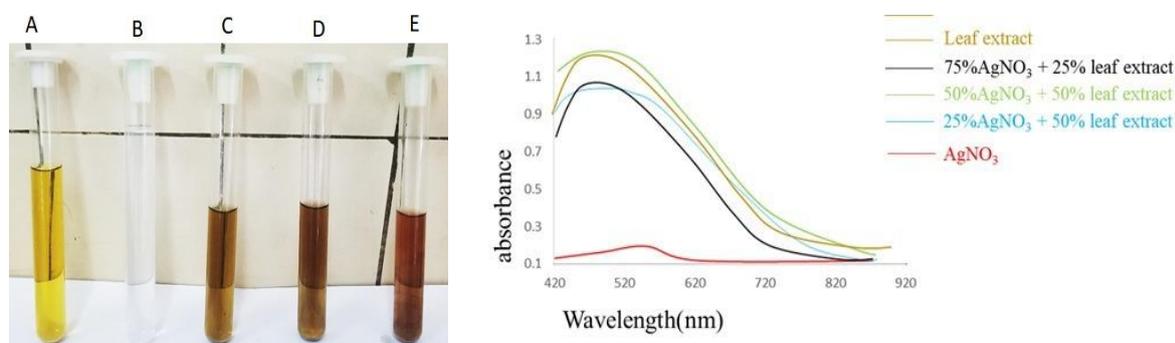


Fig. 41. Nanoparticules de nitrate d'argent formées à partir d'extrait aqueux de *Tithonia diversifolia* et les courbes d'absorption correspondantes

III.1.4.2.2. Inhibition de la croissance mycélienne de *Phytophthora* spp. par les AgNPs

Les AgNP synthétisées ont été utilisées pour tester leur efficacité sur les quatre espèces de *Phytophthora* préalablement isolées. La figure 42 montre la croissance de *P. cinnamomi* (Fig. 43A), *P. citrophthora* (Fig. 42B), *P. nicotianae* (Fig. 42C) et *P. palmivora* (Fig. 42D) vis-à-vis des différents traitements. Dans le cas de *P. cinnamomi*, l'agent pathogène seul (témoin), l'agent pathogène en présence de l'extrait aqueux de *T. diversifolia* (T_{DEA}), et l'agent pathogène en présence du fongicide de référence (Metalaxyl-M 6 % + Copper Oxide 60 % ; utilisé à 3,33g/l), ont atteint leur croissance mycélienne maximale (100 %) au jour 3. En revanche, dans les boîtes de Pétri où les agents pathogènes étaient en présence des trois traitements à base de nanoparticules de nitrate d'argent (AgNP) (25 % AgNO₃ + 75 % T_{DEA}, 50 % AgNO₃ + 50 % T_{DEA} et 75 % AgNO₃ + 25 % T_{DEA}) et de la solution AgNO₃ (1mM), l'agent pathogène se développe lentement et atteint un taux de croissance mycélienne de presque 50 % au jour 7.

Dans le cas de *P. citrophthora*, une croissance mycélienne plus lente est observée. Le T_{DEA} (50 %), le fongicide de référence et le contrôle ont les valeurs de taux de croissance les plus élevées après le jour 7, avec des valeurs de 50, 75 et 100 % respectivement. Pour les boîtes dans lesquelles les agents pathogènes étaient en présence des trois traitements AgNP (25 % AgNO₃ + 75 % T_{DEA}, 50 % AgNO₃ + 50 % T_{DEA} et 75 % AgNO₃ + 25 % T_{DEA}) et de la solution AgNO₃ (1mM), une croissance mycélienne relativement lente a été observée, stagnant autour de 30% à la fin du jour 7.

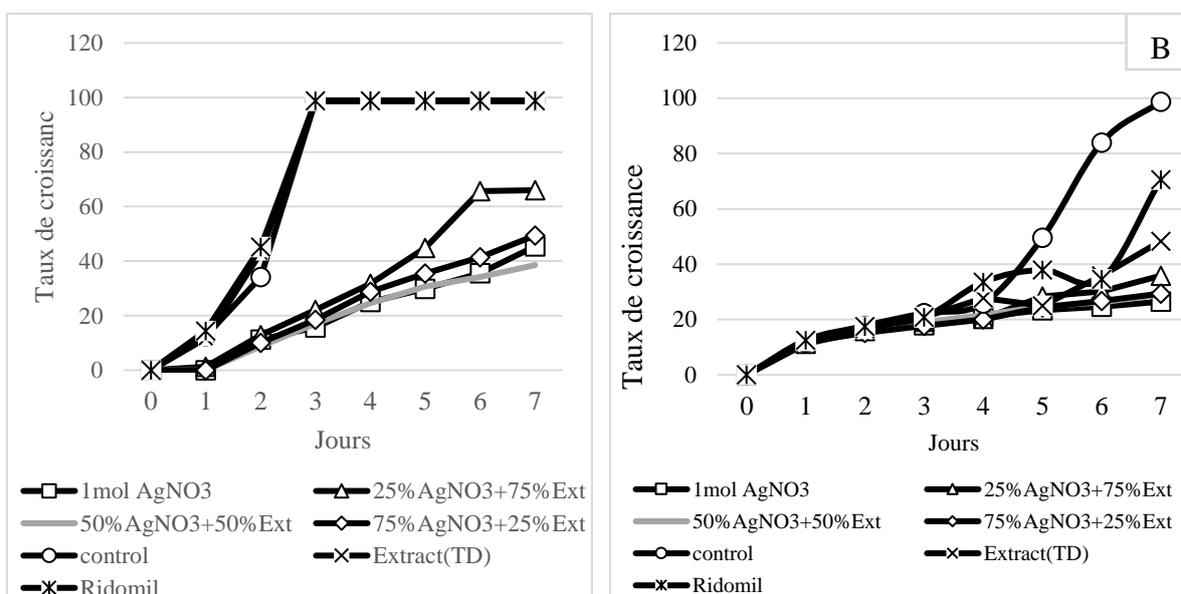


Fig. 42. Inhibition de la croissance de *Phytophthora* spp. par les nanoparticules de nitrate d'argent à base d'extrait aqueux de *T. diversifolia*

(A) *P. cinnamomi* et (B) *P. citrophthora*

Pour ce qui est de *P. nicotianae*, le Td_{EA} (50 %), le fongicide de référence et le contrôle ont eu les valeurs de taux de croissance les plus élevées au bout de jour 7. Les valeurs du taux de croissance de ces isolats partent de 80 à 100 %. Le traitement AgNP (75 % AgNO₃ + 25 %) a inhibé la croissance mycélienne à près de 30 % alors que les autres traitements AgNP (25 % AgNO₃ + 75 % Td_{EA}, 50 % AgNO₃ + 50 % Td_{EA}) et la solution AgNO₃ (1mM) l'ont fait avec des valeurs entre 40 et 60 % à la fin du jour 7.

Dans le cas de *P. palmivora*, seul le contrôle a montré une croissance mycélienne rapide, laquelle a atteint son maximum de croissance au 4^{ème} jour. La croissance mycélienne de *P. palmivora* était également élevée en présence du Td_{EA} avec une valeur supérieure à 40 %. Pour tous les autres traitements, la croissance mycélienne est restée inférieure à 20 %.

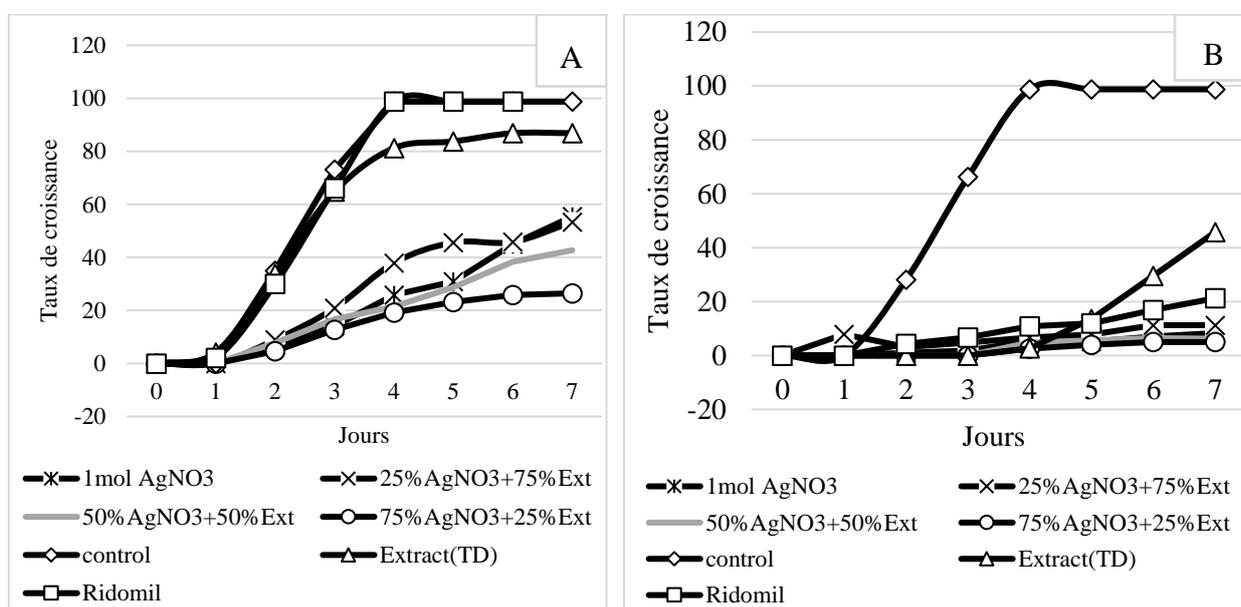


Figure 43. Inhibition de la croissance de *Phytophthora* spp. par les nanoparticules de nitrate d'argent à base d'extrait aqueux de *T. diversifolia*

(A) *Phytophthora nicotianae* et (B) *P. palmivora*

III.1.4.2.3. Efficacité des AgNP sur les *Phytophthora* spp. inféodées aux agrumes.

L'efficacité des traitements varie considérablement en fonction des espèces de *Phytophthora*, du type de traitement et de la dose. Dans le cas de *P. cinnamomi*, *P. citrophthora* et *P. nicotianae*, l'efficacité varie entre 50 et 80 %. Vis-à-vis de *P. nicotianae*, cette efficacité dépasse 80 % avec le traitement Td_{EA}75 % AgNO₃+25 %. Pour ces agents pathogènes, on a observé une différence significative entre les traitements. Le Td_{EA} et le fongicide de référence présentent chacun une efficacité plus faible que les traitements à base d'AgNP, quelles que soient les proportions d'AgNO₃ (1 mM) (Fig. 44).

Pour ce qui concerne *P. palmivora*, tous les traitements appliqués ont montré une efficacité supérieure à 90 %. Sur cette dernière espèce, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements. Cependant, le Td_{EA} et le fongicide de référence ont montré la plus faible efficacité.

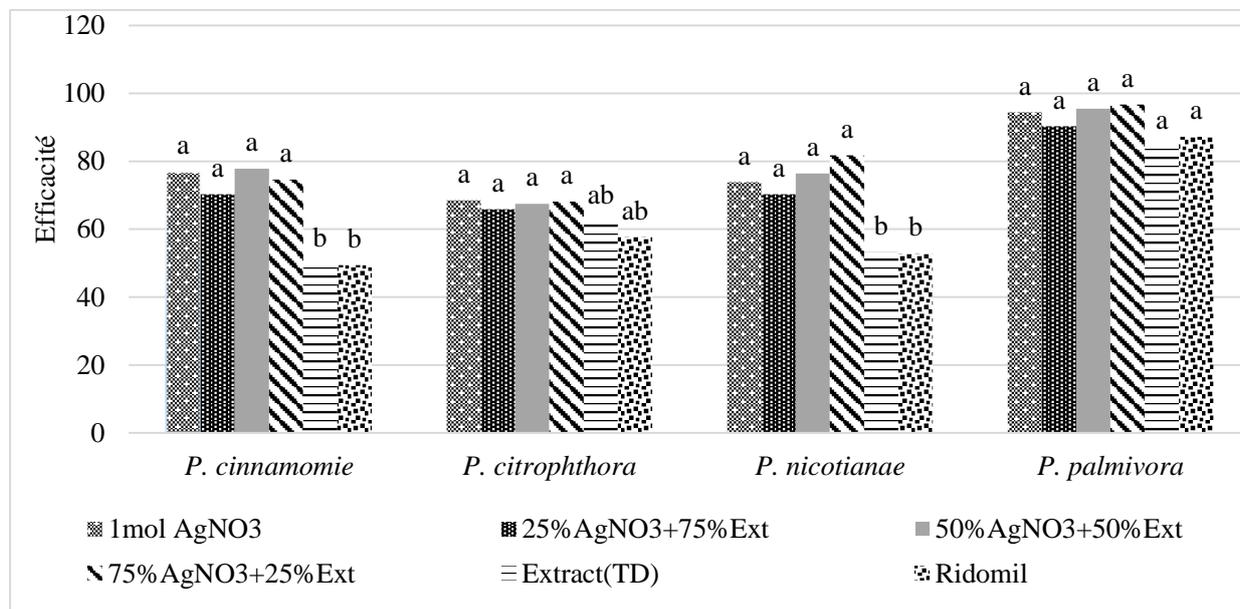


Fig. 44. Efficacité in vitro des AgNPs sur les espèces de *Phytophthora* responsables de la gommose sur les agrumes

III.2. Discussion

III.2.1. Intensité de la gommose et espèces de *Phytophthora* responsables de la maladie dans les zones de forêts humides du Cameroun

La connaissance de l'agent pathogène responsable d'une maladie est indispensable à la mise au point d'une stratégie de gestion raisonnée et appropriée. Le premier objectif de cette étude était de faire un état des lieux de la situation épidémiologique de la gommose dans les sites d'étude. Ceci a conduit à la quantification de la maladie et à l'identification des agents pathogènes responsables de la gommose sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun. Les résultats ont montré que IG varie significativement selon les sites d'étude, les systèmes de production, les espèces et l'âge des agrumes. Les résultats confirment la forte intensité de cette maladie signalée dans la zone d'étude par les travaux antérieurs (Ndo et al., 2019). La forte intensité de la gommose observée dans les zones de forêts humides à pluviométrie monomodale pourrait être la conséquence de la forte humidité relative et de la forte pluviométrie relevées dans ces zones. En effet, Wagh et al. (2018) ont mis en évidence une augmentation constante de la population des *Phytophthora* sur des mandariniers avec l'augmentation de la pluviométrie et de l'humidité relative. La pluie joue un rôle déterminant dans la dispersion de l'inoculum des *Phytophthora* et les fortes pluies augmentent drastiquement les quantités d'inoculum et la dispersion de la maladie (Granke

et *al.*, 2012; Lad et *al.*, 2021). Toutefois, dans le cas de cette étude, il est à remarquer que les sites de la zone de forêt dégradée, bien qu'étant moins humides que ceux de la zone de forêt dense, montrent une forte intensité de la gommose. Ceci amène à penser que d'autres facteurs entrent en jeu dans le développement de l'épidémie de la gommose sur les agrumes.

Une différence significative de IG a été observée entre les systèmes de production des agrumes. Les agrumes plantés dans des jardins de case et dans les vergers associés aux cultures annuelles ont été significativement ($P=0,005$) plus attaqués par la gommose que ceux plantés dans des vergers associés à d'autres arbres fruitiers, ceux plantés dans des vergers purs et les SAFC. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que, dans les vergers d'agrumes associés aux cultures annuelles, le sol est souvent labouré et cette pratique pourrait entraîner les blessures au niveau des racines, ce qui facilite la pénétration des structures de propagation des *Phytophthora*. La propagation de la gommose dans les vergers d'agrumes par des blessures sur les racines a été montré par O'Gara et *al.* (1997) et par Graham et Feichtenberger (2015). Dans le cas des agrumes plantés dans des jardins de case, la forte intensité de la gommose s'expliquerait par la présence en abondance de la matière organique dans la rhizosphère, qui favoriserait l'activité fongique dans le sol. En effet, les ordures ménagères et les déjections des animaux sont souvent entassées directement sur le collet des agrumes plantés autour des maisons. Cette pratique entraîne une augmentation de la matière organique du sol, et par conséquent, une augmentation de l'activité microbienne (Santonja et *al.*, 2017). Pour Tayyab et *al.* (2019) qui ont évalué l'effet à court terme de différents amendements organiques sur la composition fongique du sol, ces auteurs ont montré qu'un apport excessif de matière organique augmente la densité des champignons du sol. Ces champignons pouvant être des agents pathogènes pour les plantes.

La biodiversité élevée dans les SAFC et par extension dans les vergers associés aux autres arbres fruitier pourrait expliquer la faible intensité de la gommose des agrumes observée dans ces systèmes de production (Akoutou et *al.*, 2020; Ndo et Akoutou, 2021). Par ailleurs, toutes les espèces d'agrumes observées dans cette étude sont attaquées par la gommose. Cependant, *C. medica* et *C. volcameriana* (largement utilisé comme porte greffe au Cameroun) sont les espèces les moins attaquées contrairement aux *C. maxima*, *C. paradisi* et *C. reticulata*. Cacciola et Lio (2008) ont montré que toutes les espèces et cultivars d'agrumes sont sensibles aux *Phytophthora*. Toutefois cette sensibilité varie entre les différentes espèces et certaines le sont plus que d'autres (Virk et Nagpal, 2012).

Les résultats ont également montré que les agrumes ayant un âge intermédiaire sont moins attaqués par la gommose contrairement à ceux qui sont plus jeunes et ceux qui sont plus âgés. Ce résultat peut se justifier par le fait que, d'une part, les agrumes plus jeunes sont plus sensibles aux

Phytophthora, et d'autres parts, il a été montré que la sévérité des attaques dues aux *Phytophthora* est positivement corrélée à l'âge des agrumes (Alvarez et al., 2008; Vicent et al., 2012). Les résultats obtenus dans cette étude corroborent ceux de Chaudhary et al. (2020) qui ont montré que les agrumes de plus de 20 ans présentent des intensités de gommose significativement plus élevées que les plus jeunes. Cela pourrait être justifié par le fait que les *Phytophthora* puissent hiberner pendant de nombreuses années dans le sol. Avec le temps, la réponse immunitaire face aux attaques incessantes de *Phytophthora* devient de plus en plus faible conduisant à des attaques de collet et à une mortalité croissante, souvent causée par des bioagresseurs secondaires.

Sur la base de leurs caractères morpho-cultureux et en comparaison à la clé taxonomique *Lucid* (Ristaino, 2012; Anonyme, 2023b), *Phytophthora citrophthora*, *P. nicotianae*, *P. palmivora* et *P. cinnamomi* var *cinnamomi* sont les quatre espèces inféodées aux agrumes dans la zone de forêts humides du Cameroun. Parmi ces quatre espèces, *P. nicotianae*, *P. palmivora* et *P. citrophthora* sont reconnues comme celles qui causent le plus de dégâts dans les zones tropicales (Graham et Timmer, 1994; Ristaino, 2012). *P. citrophthora* a enregistré la plus forte prévalence par rapport à *P. nicotianae*, *P. palmivora* et *P. cinnamomi*. Ceci s'expliquerait par le fait que les conditions climatiques de la zone d'étude (température élevée et forte humidité) sont propices au développement de cette espèce. En effet, selon Mounde (2012) et Li et al. (2015) *P. citrophthora* peut se développer à des températures comprises entre 12 et 35 °C. De même, la température idéale pour le développement de *P. nicotianae* est de l'ordre de 28 - 35 °C, ce qui expliquerait la forte prévalence de ce dernier dans les climats très chauds comme les zones de forêts humides et notamment dans les sites de Njombé et Makondo. Par ailleurs, Panabières et al. (2016) ont montré que *P. nicotianae* était plus agressif dans les zones à climat chaud. La forte présence de *P. palmivora* uniquement dans les sites de Kédia et Goura pourrait être justifiée par le fait que, dans ces localités, les agrumes sont beaucoup plus produits en association avec le cacaoyer, qui est considéré comme un hôte primaire de *P. palmivora*. De plus, en dehors du cacaoyer, plusieurs autres arbres sont hôtes secondaires des *Phytophthora* au sein des SAFC. Ainsi, du fait de leur caractère polyphylétiques, on pourrait entrevoir une forte dynamique des *Phytophthora* dans ces systèmes de production (Rajput et al., 2020).

III.2.2. Effet des caractéristiques structurales du SAFC sur IG

Le second objectif spécifique de cette étude était d'évaluer l'effet des caractéristiques structurales du SAFC sur IG des agrumes. Pour ce faire, les caractéristiques structurales des SAFC ont été caractérisés. Pour ce qui est de la structure du peuplement végétal, les résultats ont montré que, des 10 principaux arbres d'ombrage identifiés, quatre étaient des espèces d'arbres forestiers. Il s'agit de *Ceiba pentandra*, *Glyricidia sepium*, *Terminalia superba* et *Spathodea campanulata*. Ces

espèces sont comptées parmi celles que l'on trouve couramment dans les SAFC au Cameroun (Jagoret et al., 2014; Mbololo et al., 2016; Saj et al., 2017). Ces arbres d'ombrage ont également été reportés dans des SAFC d'autres pays africains comme le Ghana (Abdulai et al., 2018), le Nigeria (Oke et al., 2020), ainsi que la Côte d'Ivoire (Gyau et al., 2015). Le deuxième groupe d'arbres d'ombrage est celui des arbres fruitiers. Cinq espèces de ce groupe sont présentes dans le top 10 des espèces d'ombrage dans les SAFC recensés. Il s'agit de *Dacryodes edulis*, *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Spondias dulci* et *Annona muricata*. Ces espèces présentent une occurrence très élevée et sont comptées parmi les arbres associés les plus représentatifs des SAFC au Cameroun (Jiofack, 2013; Mbololo et al., 2016). En plus des arbres forestiers et fruitiers, le palmier (*Elaeis guineensis*) ou les cocotiers (*Cocos nucifera*) constituent également un groupe important qui fournit de l'ombrage dans les SAFC (Sonwa et al., 2014).

Le taux d'ombrage dans les SAFC varie considérablement entre les parcelles et les sites d'étude. Le site de Muyuka a montré le plus faible taux d'ombrage comparé aux quatre autres sites. Dans cette localité, les SAFC sont le plus souvent simplifiés à des exploitations à faible biodiversité composées principalement de cacaoyers et d'arbres fruitiers. Cette simplification des SAFC pourrait s'expliquer par le fait que, dans cette zone, la très forte humidité relative favorise le développement de la pourriture brune des cabosses de cacao, causée par *Phytophthora megakarya*. Ainsi, les agriculteurs sont amenés à simplifier leurs exploitations en réduisant le nombre d'arbres d'ombrage. Ceci conduit à une réduction significative de l'intensité de l'ombrage en quantité et en qualité. Par ailleurs, les SAFC présentant un nombre parfois très élevé d'arbres d'ombrage et un taux d'ombrage également élevé ont été trouvés dans les sites d'Evodoula, de Bikok et de Boumnyebel. Le taux d'ombrage élevé observé dans les SAFC de ces sites est corrélé aux fortes densités d'arbres d'ombrage observées, comme l'ont démontré Nesper et al. (2017) et Tschardt et al. (2011). Les SAFC présentant un faible nombre d'arbres d'ombrage et un taux d'ombrage élevé sont caractéristiques du site de Bokito, qui est situé dans la zone de transition forêt-savane. Le décalage entre le nombre d'arbres d'ombrage et le taux d'ombrage dans ce site pourrait s'expliquer par le fait que dans cette zone, le précédent des SAFC est souvent une savane plus ou moins boisée (Jagoret et al., 2012; Nijmeijer et al., 2019; Ruf et Schroth, 2015; Seghieri et Harmand, 2019). L'apport d'ombrage dans ces zones est donc un impératif pour les producteurs et cela implique un choix assez judicieux d'arbres d'ombrage. Les arbres d'ombrage rencontrés dans ces zones devraient donc avoir un feuillage dense et étendu, capables de fournir un ombrage significativement suffisant, tout au long de l'année, et ce même à faible densité. Ceci explique la forte densité d'espèces fruitières telles que *Dacryodes edulis* ou encore *Mangifera indica* dans ce site. Celles-ci, en plus de leur importance dans la fourniture de l'ombrage, assurent un rôle économique indéniable (Kuate et al., 2006).

L'analyse de la structure spatiale réalisée avec la fonction Ripley a mis en évidence trois motifs d'organisation spatiale des agrumes dans les SAFC. Les résultats ont montré que les agrumes ont une structure spatiale généralement aléatoire à tendance soit agrégée soit régulière. Ces résultats corroborent ceux de Gidoïn (2013) qui a affirmé que les arbres fruitiers dans les SAFC au Centre Cameroun ont une structure spatiale que l'on pourrait qualifier d'intermédiaire entre les arbres forestiers et les cacaoyers. En effet, les agrumes, tout comme les autres arbres fruitiers, sont généralement introduits par les producteurs dans les SAFC. Très souvent, ils sont plantés de préférence à des endroits de la parcelle où le cacaoyer n'a pas réussi. Ceci justifie la régularité des agrumes dans 37 % des parcelles. Par ailleurs, la structure spatiale aléatoire observée pourrait probablement s'expliquer par la volonté des agriculteurs d'obtenir un ombrage uniforme sur les cacaoyers dans les parcelles. Ainsi, en fonction de la répartition des arbres forestiers dans la parcelle, les arbres fruitiers sont souvent plantés préférentiellement dans les zones de la parcelle où les arbres forestiers fournissent peu, ou ne fournissent pas d'ombrage. Ceci présente le double avantage de maximiser la production des arbres fruitiers eux-mêmes, tout en créant de l'ombrage pour la culture principale.

Les stratégies de choix de structure spatiale des agrumes trouvent leur origine dans la complexité des facteurs qui peuvent être exogènes, notamment les facteurs pédoclimatiques, ou ceux liés à la gestion de l'exploitation. Ces facteurs peuvent également être endogènes. Dans ce cas, on citera la composition du peuplement, le mode de régénération, l'intensité de gestion. (Gidoïn, 2013 ; Ngo Bieng et *al.*, 2017). Une forte variabilité ($P < 0,001$) a été observée pour les valeurs de $L(r)$ entre les types de structure spatiale. Cette variabilité pourrait être expliquée non seulement par la méthode utilisée pour la collecte des données spatiales mais aussi par la forte variation du nombre d'individus dans les parcelles. La structure spatiale aléatoire au sein des SAFC donne lieu à une variété d'environnements locaux qui favorisent la coexistence de différents types fonctionnels (Gidoïn et *al.*, 2014). Ce mode d'organisation spatiale pourrait également contribuer à augmenter les chances de survie des arbres associés inférieurs en limitant la compétition interspécifique (Goreaud et Pelissier, 2000). Ainsi, la structure aléatoire peut être considérée comme favorable à l'épanouissement de la biodiversité. Ceci pourrait être confirmé par la distribution naturelle des espèces dans les forêts naturelles. Les structures agrégées qui sont secondes en termes de représentativité peuvent également s'expliquer par cette possibilité dans les forêts tropicales par exemple, où les arbres se trouvent dans des niches spatiales favorables à leur développement (Ledo et Schnitzer, 2014). Les niches spatiales favorisent la biodiversité et conduisent à une agrégation intraspécifique ainsi qu'à une ségrégation interspécifique. Par analogie, il est supposé ici que le regroupement d'arbres forestiers favorise la création de lacunes dans les SAFC, ce qui peut

conduire les producteurs à combler ces lacunes en introduisant des arbres fruitiers, ce qui entraîne une diversité fonctionnelle.

Sur les 26 producteurs interrogés, 23 % ont admis ne pas connaître la répartition spatiale des agrumes dans leur exploitation. Même si 77 % d'entre eux ont déclaré connaître la structure spatiale des agrumes dans leurs SAFC, on constate un décalage entre les structures déclarées et celles réellement adoptées. Les faibles taux de coïncidence calculés entre les structures spatiales réelles et celles déclarées par les agriculteurs témoignent du fait que les producteurs interrogés ne font pas toujours des choix délibérés. Il est souvent admis que les stratégies des agriculteurs en ce qui concerne le maintien, la suppression ou l'introduction des espèces dans les systèmes agroforestiers à base de cacao sont sous le contrôle des agriculteurs (Souza et al., 2012; Sonwa et al., 2017, 2007). Les résultats obtenus dans cette étude montrent qu'il est nécessaire d'apporter un appui aux agriculteurs, notamment dans la conception des systèmes et le choix des structures spatiales. Non seulement une grande partie d'entre eux ne comprend pas l'importance de la disposition spatiale des individus, mais ceux qui déclarent connaître les structures spatiales adoptées n'ont pas toujours les connaissances exactes. De plus, les structures réellement adoptées sont celles qui favorisent la dissémination des maladies, notamment sur les agrumes (Ndo et al., 2019b).

Les producteurs ont expliqué leur choix de structure spatiale par le marquage des limites avec les SAFC voisins, l'uniformité de l'ombrage sur les cacaoyers, ou le remplacement des arbres morts (cacaoyers, forêts et autres arbres fruitiers). Ces raisons ont souvent été citées dans diverses études pour discuter de l'importance des services rendus par les arbres associés dans les SAFC (Mbolo et al., 2016; Barrios et al., 2018;). Cependant, ces raisons ne peuvent pas expliquer à elles seules la structure spatiale des agrumes dans les SAFC. Les variables de composition et de biodiversité sont impliquées dans l'adoption des structures spatiales des agrumes observées dans la SAFC. Ainsi, le nombre d'individus (cacaoyers, arbres forestiers, autres arbres fruitiers) et l'indice de biodiversité dans les SAFC ont pu expliquer la structure spatiale des agrumes dans les SAFC. La structure spatiale aléatoire des agrumes pourrait être expliquée par la forte densité de cacaoyers d'une part, et la forte densité d'agrumes d'autre part. Les structures agrégées des agrumes pourraient s'expliquer par le regroupement d'arbres fruitiers de la même espèce (ou du même genre) à des endroits spécifiques de l'exploitation. Cela pourrait également s'expliquer par l'introduction d'agrumes à des endroits précis dans les SAFC où il y a peu d'arbres forestiers. Deheuvels et al. (2012) ont supputé que les agroforêts semblent imiter la structure spatiale des forêts tropicales mais pas leur composition végétale. Nos résultats établissent un lien direct entre la composition spécifique du peuplement végétal et la structure spatiale des espèces, à l'occurrence les agrumes.

En effet, la quantité et la qualité du peuplement végétal peuvent guider ou orienter la structure spatiale adoptée pour une sous-population définie dans les SAFC.

IG s'est montrée influencé par les caractéristiques structurales du SAFC. On a ainsi observé que IG varie en fonction du taux d'ombrage dans les SAFC. En effet, pour la plupart des parcelles, notamment celles ayant de forts taux d'ombrage, IG était faible. De plus, en appliquant ce résultat à l'échelle des sites d'étude, on a constaté que, plus le taux d'ombrage est élevé, plus IG est faible. Cela prouve que le taux d'ombrage a un effet sur IG. Dans cette étude, les résultats montrent que, plus le taux d'ombrage dans un SAFC est élevé, plus IG est faible. Ainsi, il existe un effet antagoniste direct du taux d'ombrage sur IG. Des travaux antérieurs ont montré des résultats similaires sur d'autres maladies des agrumes dans les SAFC (Akoutou Mvondo et al., 2020). En effet, plusieurs études ont mis en évidence l'implication des arbres d'ombrage sur la régulation de diverses maladies et ravageurs (Tschardt et al., 2011; Pumariño et al., 2015; Andres et al., 2018; Akoutou Mvondo et al., 2020). En effet, l'ombrage affecte la température et l'humidité dans le sous-étage, ce qui, par la suite affecte l'adéquation de l'environnement pour la flore et la faune locales (Shukla et al., 2009). La différence de température entre les systèmes de culture en plein soleil et sous couvert peut être d'environ 6°C (Souza et al., 2012). En outre, la température et l'humidité du sol ont souvent une relation inverse, l'humidité du sol diminue lorsque la température augmente (Lakshmi et al., 2003; Rao et al., 2020). Cependant, il est reconnu que les *Phytophthora* spp. ont tendance à se développer au mieux à des températures comprises entre 25 et 30°C (Li et al., 2015; Panabières et al., 2016; Pietikäinen et al., 2005). Pour les espèces dudit genre, la température affecte la croissance mycélienne, la sporulation et le développement de la maladie (Granke et Hausbeck, 2010; Shelley et al., 2018). Dans ce contexte, la faible intensité de la gommose sur les agrumes plantés sous ombrage dense, par rapport à ceux plantés en plein soleil, peut s'expliquer par le fait que, de nombreuses espèces de *Phytophthora* ayant leur température optimale de croissance supérieure à 30°C (Meena et al., 2011), infecteraient préférentiellement les agrumes situés dans des conditions microclimatiques garantissant ces températures (en plein soleil).

En général, les *Phytophthora* sont parasites et par ailleurs des saprophytes non compétitifs dans le sol (Graham et Feichtenberger, 2015). Dans des conditions favorables, et selon la saison, ils se développent bien sur les nutriments obtenus à partir de la plante vivante et passent par des cycles répétés de mycélium à sporanges, zoospores et mycélium à nouveau (Meng et al., 2014; Gyeltshen et al., 2021; Kaur et al., 2021). Une humidité élevée et une température du sol > 10°C font partie des conditions favorables au développement des maladies causées par les *Phytophthora* (Ristaino, 2012). Cela pourrait laisser penser que, puisque l'ombrage permet ces conditions, les SAFC ayant

un taux d'ombrage élevé seraient plus affectés par la gommose. Cependant, bien que les conditions environnementales plus humides favorisent la multiplication de l'inoculum, c'est dans des conditions sèches et à température élevée que les symptômes de la maladie sont visibles (Choudhari *et al.*, 2018). En d'autres termes, des conditions environnementales hostiles favorisent l'apparition des symptômes et donc le développement de la maladie, tandis que des conditions environnementales plus fraîches favoriseraient le développement de l'inoculum et non l'expression de la maladie elle-même.

En raison de leur biodiversité et des caractéristiques structurales qui en résultent, les SAFC influencent différemment les pathosystèmes selon leur spécificité. Ils peuvent favoriser ou défavoriser la survie ou l'épanouissement d'un agent pathogène donné (Akoutou Mvondo *et al.*, 2020; Gidoïn *et al.*, 2014). Par ailleurs, les propriétés liées à la composition des SAFC sont davantage liées aux mécanismes d'altération des ressources alors que les caractéristiques de la structure de la végétation impliquent des mécanismes d'altération microclimatique. En particulier, les variations microclimatiques sont connues pour influencer les ravageurs directement mais aussi indirectement en affectant la croissance des plantes et donc la quantité de ressource pour ces différents organismes (Ratnadass *et al.*, 2012). Cependant, ces mécanismes ne sont pas exclusifs (Gidoïn, 2013; Akoutou Mvondo *et al.*, 2020). En effet, dans des conditions réelles, une biodiversité accrue peut conduire à des interactions diversifiées et ainsi aboutir à un effet net de réduction ou d'augmentation de l'intensité des ravageurs (Schroth *et al.*, 2000). Dans le cas des agrumes au sein de SAFC, il convient de noter que, certains facteurs intrinsèques, ainsi que d'autres facteurs environnementaux tels que la structure spatiale des agrumes, doivent être pris en compte pour expliquer IG observée. Par ailleurs, en dehors de cet effet des facteurs microclimatiques résultant de la biodiversité végétale, il est également admis de prévoir l'effet suppressif de la microflore sur les *Phytophthora*. En effet, nous pouvons postuler que les parcelles ayant des taux d'ombrage élevés, sont celles qui ont une plus grande diversité végétale, plus de litière et un sol plus actif biologiquement, et donc une microflore plus suppressive ; et de ce fait, celles qui imitent mieux un écosystème naturel où les des agents pathogènes sont maintenus en équilibre par l'activité d'autres organismes.

Il est également pertinent d'observer la dynamique des *Phytophthora* au sein des SAFC. En effet, la plupart des espèces de *Phytophthora*, y compris celles qui parasitent les agrumes, ont une capacité de colonisation compétitive faible ou nulle. Elles ont une faible capacité à se développer dans un sol non stérile, et la survie à long terme est cependant assurée par des propagules durables comme les chlamydospores et les oospores (Brazier, 1998). Néanmoins, la plupart des espèces de *Phytophthora* infestent généralement une large gamme de plantes dans les écosystèmes agricoles

et naturels (Graham et Feichtenberger, 2015). A cet effet, vue la forte biodiversité floristique trouvée dans les SAFC, il est possible que les espèces de *Phytophthora* infectant les agrumes puissent trouver des hôtes alternatifs dans les SAFC. En effet, plusieurs espèces de *Phytophthora* s'attaquent à diverses espèces d'arbres communément trouvées dans les SAFC telles que l'avocatier, parasité par *P. palmivora*, *P. cinnamomi*, *P. cactorum*, *P. citricola*, *P. citrophthora*, *P. heveae* et *P. nicotianae* (Ali et al., 2018); le manguier, parasité par *P. palmivora*, *P. parasitica* et *P. citricola* (Rodriguez-Padron et al., 2018; Salgadoe et al., 2019; Sumida et al., 2020) ; le colatier (*Cola nitida*) parasité par *P. megakarya* (Nyassé et Efombagn, 2017). Par-dessus toutes ces espèces, le cacaoyer, en tant que culture principale, est hôte de *P. megakarya*, *P. palmivora* et *P. capsisci* (Pakora et al., 2018; Perrine-Walker, 2020). Cette forte présence d'hôtes alternatifs potentiels d'espèces de *Phytophthora* assure une forte dynamique de l'inoculum dans les SAFC. Ainsi, on peut percevoir qu'à mesure que la diversité végétale au sein des SAFC augmente, il y aurait une augmentation de la probabilité que les *Phytophthora* qui infectent les agrumes trouve des hôtes alternatifs. Ainsi, en raison de cette forte présence d'hôtes alternatifs, on serait tenté de croire que la biodiversité élevée dans les SAFC contribuerait au développement accru des espèces de *Phytophthora*. Cependant, pour les agents pathogènes généralistes, tels que *Phytophthora*, il est difficile de définir l'équilibre entre l'effet de la réduction de sa ressource habituelle dans l'agroécosystème étudié et l'effet de la présence d'une ressource alternative à fort potentiel (Ratnadass et al., 2012). Néanmoins, dans le cas de cette étude, les résultats ont montré que, parmi les espèces les plus communes, à part le manguier et l'avocatier, toutes les autres ne sont pas connues comme hôtes potentiels de *Phytophthora*. De plus, étant donné que l'ombrage limiterait la propagation des espèces de *Phytophthora*, du moins celles qui sont inféodées aux agrumes, et que la biodiversité conduit à des taux d'ombrage élevés, une nette diminution de IG sur les agrumes pourrait être entrevue dans les SAFC.

La grande biodiversité dans les SAFC pourrait contribuer à la régulation de l'agent pathogène par l'effet physique du système. L'effet physique d'une plante sur un organisme est dû au fait que la plante agit comme une barrière physique plutôt que comme un être vivant (Keesing et al., 2006, 2010). Cette barrière affecte directement l'organisme et ses mouvements, mais elle affecte également les variables abiotiques du système (lumière, eau, vent), ce qui crée un microclimat qui affecte l'organisme et sa plante hôte (Gidoïn et al., 2014). Par conséquent, l'effet physique est déterminé par la structure spatiale des plantes dans l'agroécosystème (Ndo et Akoutou Mvondo, 2021; Jonsson et al., 2015). Ainsi, dans le cas précis de cette étude, la forte biodiversité dans les SAFC contribue à la régulation de la gommose par le fait que les agrumes placés à l'ombre d'autres espèces bénéficient de ces mécanismes d'effet physique contrairement à ceux ne recevant pas cet ombrage. Cependant, nous pouvons postuler que cet équilibre dépend en grande partie de la

différence de sensibilité des espèces végétales hôtes vis-à-vis de l'agent pathogène. Il est donc essentiel d'étudier la dynamique des *Phytophthora* afin de déterminer la sensibilité des hôtes alternatifs potentiels dans les SAFC.

Les résultats ont montré une différence hautement significative de IG entre les trois types de structure spatiale ($P = 0.001$). Les parcelles avec une structure spatiale régulière étaient moins attaquées par la gommose et celles avec une structure spatiale agrégée et aléatoire l'étaient bien plus. Des résultats similaires ont été obtenus par (Ndo et al., 2019a). Brown (2004) ont montré que l'agrégation des populations hôtes favorise la dispersion des agents pathogènes alors que leur régularité la diminue. En effet, lorsque les peuplements d'agrumes sont agrégés sans aucune barrière physique entre eux, les zoospores de *Phytophthora* se déplacent facilement des arbres infectés vers ceux qui sont sains, probablement d'une racine à l'autre. Avec de telles structures spatiales, la projection du sol vers les organes aériens est également facilitée (Boudreau et al., 2015). Dans les structures spatiales aléatoires, certains agrumes peuvent être agrégés tandis que d'autres peuvent être régulièrement répartis, mais ayant de très faibles écartements. Ceci peut donc justifier la forte sévérité de la gommose dans les parcelles à structure spatiale agrégée et aléatoire contrairement aux structures spatiales régulières. Par ailleurs, la structure spatiale de l'inoculum de *Phytophthora* dans le sol est aléatoire ou agrégée (Graham et al., 2013). Cependant, la structure spatiale ne justifie pas à elle seule le niveau de IG observée dans les SAFC. D'autres paramètres biotiques et abiotiques qui doivent être bien déterminés influenceraient également la dissémination de *Phytophthora*.

III.2.3. Effet des facteurs pédoclimatiques et agronomiques sur IG

Dans cette étude, les facteurs de risque épidémiologiques de la gommose dans les sites d'étude ont été analysés et des modèles de prédiction pour la gestion de la maladie sur les trois principales espèces d'agrumes ont été établis. Sur les 39 variables réponses pédoclimatiques et agronomiques incluses dans l'analyse de régression, 21 ont été considérées comme significatives pour la construction du modèle, avec des VIP > 1. Des variations significatives desdites variables ont été observées pour les trois espèces d'agrumes. L'effet de ces variables sur IG pour chacune des espèces d'agrumes doit donc être exploré.

Trois variables climatiques, donc la température, l'humidité relative et la pluviométrie sont comptées parmi les facteurs de risque épidémiologiques les plus importants pour IG sur *C. sinensis*. Ces variables n'affectent pas IG sur les deux autres espèces d'agrumes. Sur *C. sinensis*, la température était négativement corrélée à IG, tandis que la pluviométrie et l'humidité relative l'étaient positivement. Des travaux antérieurs ont montré que les facteurs climatiques influencent les maladies à *Phytophthora* chez les agrumes (Granke et Hausbeck, 2010; Kaur et al., 2021). En

fait, Choudhari et al. (2018) ont trouvé une corrélation positive entre la pluviométrie et l'humidité relative d'une part et la progression de la gommose d'autre part. ces auteurs ont mis en évidence une corrélation inverse avec la température ambiante. Bien que nos connaissances soient limitées sur la manière dont les espèces de *Phytophthora* tolèrent les stress abiotiques, il est néanmoins reconnu ici que ces facteurs sont essentiels à l'épidémiologie des maladies liées à *Phytophthora* (Puig et al., 2018).

En ce qui concerne la température, plusieurs études ont montré son impact sur différentes espèces de *Phytophthora* ainsi que sur diverses maladies causées par les agents pathogènes du même genre (Granke et Hausbeck, 2010; Shelley et al., 2018; Endes et Kayim, 2022; Scagel et al., 2023; Wu et al., 2022). Une augmentation de la température favorise l'augmentation de la maladie chez des espèces telles que *P. parasitica* et *P. palmivora*, alors qu'elle entraîne une diminution de la population de *P. citrophthora*. Un climat chaud et sec est favorable à *P. parasitica*. La température seuil pour *P. parasitica* est de 33 °C et plus. Une multiplication par cinq de la motilité des zoospores de *P. citrophthora* a été observée lors du passage de 24 °C à 30 °C (Matheron et al., 1998). Une augmentation des sporanges et de la libération des spores due à des températures élevées a été démontrée (Pinu et al., 2019). Ces derniers auteurs ont identifié une température de 10 °C et une humidité relative de l'air de 80 % comme le seuil minimal pour une concentration significative de sporanges. Il a également été démontré que l'augmentation de la température expérimentale augmentait la variation de l'agressivité de *P. infestans*. L'étude des effets de la température de la zone racinaire sur la virulence de certaines espèces du genre a révélé qu'une température de 20 °C augmentait la pourriture des racines et la colonisation chez *P. pseudocryptogea* et *P. erythroseptica*, tandis que *P. cryptogea* provoquait la plus grande pourriture des racines et la plus grande colonisation à 25 °C (Delshad et al., 2020). Similairement, Endes et Kayim (2022) ont montré que le taux de croissance mycélienne augmentait avec la température. Ainsi, bien que les *Phytophthora* soient des organismes cosmopolites, les facteurs environnementaux, en particulier la température, sont essentiels au développement de la maladie. Tous les travaux cités ci-haut ont montré que la température affecte différemment les espèces de *Phytophthora*. Ainsi, l'effet de la température sur IG pourrait dépendre du génotype de la plante et de l'espèce d'agent pathogène en présence. Cela pourrait expliquer le fait que, dans le cas particulier de cette étude, d'une part, l'effet de la température soit significatif sur une seule espèce d'agrumes ; d'autre part, il existe une corrélation négative entre cet effet et IG.

La pluviométrie et l'humidité relative se sont également révélées être des facteurs de risque épidémiologiques pour IG. Ces variables ont montré une corrélation positive avec IG. Plusieurs travaux ont souligné l'importance de ces variables sur les maladies causées par une diversité

d'espèces de *Phytophthora* (Granke et Hausbeck, 2010 ; Homet et al., 2019 ; Lad et al., 2021 ; Laura Meno et al., 2023 ; L. Meno et al., 2023 ; Motisi et al., 2022 ; Ristaino et Gumpertz, 2000 ; Wu et al., 2022). L'un des cas les plus intéressants est celui des travaux de Lad et al. (2021), qui ont montré que les populations des agents pathogènes du genres *Phytophthora* augmentent de manière significative après de fortes pluies. Dans cette étude, la population de *Phytophthora* et la progression de la maladie étaient directement proportionnelles aux variables environnementales et pédologiques telles que la pluviométrie, l'humidité relative et l'humidité du sol, mais inversement proportionnelles à la température de l'air. D'autres travaux ont également montré que le maximum de population de *P. nicotianae* dans la rhizosphère des agrumes se produisait au cours des mois où la pluviométrie et l'humidité relative étaient les plus élevées. Une corrélation significative a été trouvée entre la densité de dispersion de l'agent pathogène et ces facteurs climatiques (Kaur et al., 2022, 2021).

Le modèle construit dans cette étude a permis de retenir sept variables agronomiques comme facteurs de risque épidémiologique pour IG pour les trois espèces d'agrumes. Il s'agit des systèmes de production (jardin familial, verger associé à d'autres arbres fruitiers et verger en monoculture), des trois modalités de traitements phytosanitaires (fongicide, insecticide et mélange des deux) et enfin, de l'âge des agrumes compris entre 10 et 20 ans. Cependant, les traitements phytosanitaires se sont révélés comme facteur agronomique le plus important expliquant IG, en particulier chez *C. sinensis*. Les traitements insecticides et les traitements mixtes sont les deux variables incluses dans le réseau des moindres carrés dans le tracé PLS de IG dans les trois espèces d'agrumes. Ces deux variables sont positivement corrélées avec IG. Ces résultats mettent en évidence l'inefficacité, voire la dangerosité, des mesures de lutte contre les bioagresseurs utilisées par les agriculteurs sur les agrumes. Comme l'explique Kuate et al., (2006), l'application non avisée de pesticides sur les arbres fruitiers dans le contexte de la production fruitière au Cameroun est problématique. En effet, les traitements tel que pratiqués peuvent être totalement inappropriés, voir nocifs pour la santé des cultures fruitières. Par exemple, les fongicides couramment utilisés contre la pourriture brune des cacaoyers ne sont pas efficaces contre les maladies des agrumes. En effet, la plupart des petits agriculteurs camerounais n'utilisent pas de traitements phytosanitaires appropriés et spécifiques pour les cultures fruitières. Mais comme ces cultures sont souvent cultivées dans des systèmes agroforestiers en association avec des cultures de rente, elles prennent une importance secondaire. Les agriculteurs appliquent donc à tort des traitements phytosanitaires destinés aux cultures de rente. Ces traitements phytosanitaires inappropriés n'auront donc aucun effet sur les maladies visées. Il est également opportun ici de remettre en question le fait que certains agriculteurs utilisent couramment des doses excessives de pesticides souvent inappropriés pour les cultures fruitières (Ndo et al., 2023). Cela peut avoir de nombreux effets négatifs, notamment la pollution

du sol et de l'environnement et la présence de résidus toxiques sur les cultures (Bahukhandi et al., 2022; Hassaan et El Nemr, 2020). En outre, les traitements insecticides, qui ciblent souvent à tort les lésions de cercosporiose (causée par *Pseudocercospora angolensis*), ne sont pas efficaces pour contrôler le pathogène ciblé, ni même les *Phytophthora* spp. Ceci est donc en accord avec les innombrables études précédentes qui mentionnent que, dans le contexte local, les agrumes, comme la plupart des autres arbres fruitiers, ne reçoivent pas des traitements phytosanitaires adéquats (Akoutou Mvondo et al., 2020; Kuate et al., 2006; Ndo et al., 2022; Ndo et al., 2019a,b).

Trois variantes de systèmes de production d'agrumes ont été identifiées comme facteurs de risque épidémiologique pour IG. Les vergers purs et les vergers associés à d'autres arbres fruitiers, qui présentaient une corrélation négative avec IG ; tandis que les jardins de case présentaient une corrélation positive. Pour les agrumes plantés dans des jardins de case, IG élevée peut s'expliquer par la présence abondante de matière organique dans la rhizosphère, suite au fait que les déchets ménagers sont souvent déversés directement sur le collet des agrumes. La présence de la matière organique favorise non seulement le maintien d'un fort taux d'humidité, mais surtout l'activité fongique dans le sol (Santonja et al., 2017). Tayyab et al. (2019), qui ont étudié les effets à court terme de différents amendements organiques sur la composition fongique du sol, ont montré que l'ajout excessif de matière organique augmente la densité des microorganismes du sol. Ceux-ci peuvent être des agents pathogènes pour les plantes. Par contre, dans les systèmes de culture associés à d'autres arbres fruitiers, en raison de leur biodiversité et des caractéristiques structurelles qui en résultent, les agents pathogènes peuvent être influencés au moins par l'effet biologique caractérisé par la réduction des ressources et l'apparition d'organismes antagonistes qui sont souvent abondants dans les systèmes diversifiés (Ratnadass et al., 2012; Gidoin et al., 2014; Ndo et al., 2023). En particulier, il est reconnu que les variations microclimatiques influencent les ravageurs directement, mais aussi indirectement en affectant la croissance des plantes et donc la quantité et la qualité de la ressources disponibles (Ndo et Akoutou Mvondo, 2021; Ratnadass et al., 2012). Ces mécanismes ont été largement discutés dans cette étude.

Six variables pédologiques ont été identifiées comme facteurs de risque épidémiologique pour IG sur les espèces d'agrumes et les agents pathogènes. Contrairement aux variables climatiques et agronomiques, les variables pédologiques influencent IG pour les trois espèces d'agrumes. Ces variables sont l'humidité du sol, la matière organique, les argiles et limons fins. L'effet de l'humidité du sol était significatif et positivement corrélé avec IG, alors que l'effet des trois autres variables n'était pas très significatif. Des études antérieures ont montré que la nature du sol, en particulier sa texture, sa teneur en nutriments, sa composition chimique et sa teneur en eau, affecte la disponibilité des agents pathogènes (González et al., 2020; Jonsson et al., 2015; Ndo et al., 2022,

2010; Sanchez et al., 2019). En effet, les *Phytophthora* passent la majeure partie de leur cycle de développement dans le sol, où ils peuvent survivre ou former des structures résistantes pendant de longues périodes sur les débris de plantes hôtes, la matière organique du sol et les organismes libres. Les chlamydospores et les oospores sont les structures de stockage des *Phytophthora*, lesquelles permettent leur survie dans des conditions défavorables. Les chlamydospores se développent dans des conditions fraîches et sèches, avec une humidité du sol limitée, une mauvaise aération du sol, une concentration élevée de CO₂ et une absence de croissance active des racines (Virk et Nagpal, 2012). Il a été démontré que le type de sol, l'humidité élevée et les conditions de drainage peuvent avoir un impact significatif sur le potentiel phytopathogène des *Phytophthora* (Bowman et Joubert, 2020). De même Choudhari et al. (2018) ont constaté une corrélation positive entre l'humidité du sol et la progression de la maladie sur les agrumes.

L'humidité du sol est reconnue pour être un facteur fréquemment cité dans l'épidémiologie des maladies causées par les espèces de *Phytophthora* (Devaux et Haverkort, 1987; Liu et al., 2022; Tada et al., 2021). Comme l'humidité relative mentionnée plus haut, l'humidité du sol est un facteur indispensable dans le cycle de vie des pathogènes et en particulier dans le cycle de régénération de l'inoculum. Il a également été démontré que l'infestation, l'intensité et le développement des maladies causées par les *Phytophthora* sont liés au taux d'humidité (Dubey et Jain, 2016; Juroszek et von Tiedemann, 2011; Tada et al., 2021). Ainsi, bien que l'humidité relative soit une variable importante dans les cycles de vie et épidémiologique des *Phytophthora*, l'environnement direct dans lequel le système pathologique se développe, c'est-à-dire le sol, est bien plus susceptible d'influencer l'intensité de la maladie (Motisi et al., 2022; Wu et al., 2022). Par exemple, des effets interactifs significatifs entre *P. cinnamomi* et l'humidité du sol ont été mis en évidence par Homet et al. (2019). Ces auteurs ont montré que la densité de l'inoculum dans le sol nécessaire pour causer des dommages significatifs aux racines des semis de *Quercus suber* en conditions expérimentales, croissait avec l'augmentation de l'humidité du sol. En effet, Choudhari et al. (2018) ont démontré une corrélation positive entre l'humidité du sol et IG sur les agrumes. Cette humidité du sol peut être influencée par les conditions de drainage du sol. Les argiles et les limons sont les composants physiques du sol qui déterminent cette propriété (Byrne et al., 2023; Guo et al., 2020).

Quatre variables structurelles du sol ont été identifiées comme facteurs de risque épidémiologique pour de IG. Il s'agit de l'argile fin et grossier ainsi que du limon fin et grossiers et de la matière organique. Les trois premières variables sont liées à la texture du sol et sont celles qui déterminent sa capacité de drainage. En fait, les fractions combinées de sable, de limon et d'argile dans un sol déterminent sa classification texturale (Easton, 2021). Selon ce dernier auteur, la quantité d'eau qu'un sol donné peut stocker est principalement influencée par sa texture et sa teneur en matière

organique. En général, les sols contenant plus de particules de limon et d'argile ont une plus grande capacité de rétention d'eau. Dans notre modèle, ces variables sont positivement corrélées avec l'intensité de la PFRD, ce qui indique qu'elles favorisent la maladie. Bowman et Joubert (2020) ont montré que le type de sol, les conditions d'irrigation et de drainage peuvent avoir un effet significatif sur le potentiel de dommages causés par *Phytophthora*. Par ailleurs, il est souvent conseillé d'améliorer le drainage du sol dans les champs, afin de limiter l'humidité résiduelle et donc les dégâts causés par le *Phytophthora* (Rai et Guest, 2021). L'argile et le limon réduisent le drainage et contribuent à maintenir l'humidité du sol, ce qui est propice au développement de la gommose. Ainsi, comme nous l'avons déjà largement expliqué dans les paragraphes précédents, l'humidité est un facteur indispensable au cycle de vie du *Phytophthora* et au développement de la gommose. Différentes études l'ont également démontré (Granke et Hausbeck, 2010; Gyeltshen et al., 2021; Liu et al., 2018; Tada et al., 2021).

La matière organique a été retenue comme facteur de risque épidémiologique dans le modèle conçu dans cette étude. Dans ledit modèle, la matière organique est positivement corrélée avec IG pour les trois espèces d'agrumes. Des travaux antérieurs ont montré son implication dans plusieurs maladies causées par les *Phytophthora* (Cocozza et al., 2021; De Corato et al., 2016; Nesbitt et al., 1979; Ostrofsky et al., 1977). En effet, la matière organique peut supprimer certains pathogènes et en favoriser d'autres (Mazzola et al., 2001; Vestberg et al., 2011). Premièrement, les sols contenant plus de matière organique ont une plus grande capacité de rétention d'eau (Easton, 2021). Dans ce cas, l'abondance de matière organique dans le sol pourrait limiter le drainage du sol et favoriser une forte humidité. Son effet sera donc similaire à celui du limon et de l'argile, comme expliqué ci-dessus. Inversement, la matière organique du sol influencerait l'activité des espèces de *Phytophthora* en augmentant les populations microbiennes antagonistes. A cet égard, Giblin et al. (2005) ont constaté une lyse directe des hyphes et une inhibition de la germination des chlamydospores dans les sols à forte teneur en matière organique. Aryantha et al. (2000) ont également démontré la capacité des sols riches en matière organique, avec une microflore et une faune plus complexe, à supprimer l'activité de *P. cinnamomi*.

Dans le premier objectif de cette étude, il a été montré que les quatre espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes sont inégalement réparties dans les sites d'étude. Ainsi, *P. citrophthora* est l'espèce prédominante avec une prévalence de 45 %. *P. nicotianae*, et *P. palmivora* sont prévalentes à 22 % chacune tandis que *P. cinnamomi* a une prévalence de 11 %. De plus, ces différents agents pathogènes se comportent également très différemment vis-à-vis des conditions environnementales et agronomiques. Il nous semble donc évident que cette variabilité de la prévalence des agents pathogènes et leur fort potentiel d'adaptation a un impact sur l'IG dans les

sites. En effet, ces espèces d'agents pathogènes vont s'épanouir dans les sites dans lesquelles les conditions environnementales leurs sont favorables. Par ailleurs, plusieurs espèces d'agents pathogènes pouvant être présentes dans le même site, verger ou alors sur la même plante, il devient dès lors très difficile de prédire non seulement l'intensité de la maladie, mais également les traitements phytosanitaires à appliquer sur les agrumes.

III.2.4. Activité antifongique *in vitro* de deux agents de lutte biologique sur les *Phytophthora* inféodés aux agrumes

Le dernier objectif spécifique de cette étude était d'évaluer l'effet inhibiteur de deux agents de lutte biologique sur les espèces de *Phytophthora* responsables de la gombose sur les agrumes. Dans cette optique, le potentiel de *T. asperellum* comme agent de lutte biologique contre les espèces de *Phytophthora* a été mis en évidence. Les résultats ont montré une forte croissance des souches antagonistes par rapport aux agents pathogènes. La forte croissance mycélienne des souches antagonistes pourrait être expliquée par la compétition pour l'espace et les nutriments (Sharma et Gothwal, 2017). En effet, diverses espèces de *Trichoderma* produisent des sidérophores très efficaces qui chélatent le fer et empêchent les autres champignons de se développer (Chet et Inbar, 1994). A titre d'illustration, il a été démontré que *T. harzianum* inhibe la croissance de *Fusarium oxysporum* en entrant en compétition pour la colonisation de la rhizosphère et les nutriments, le biocontrôle devenant plus efficace lorsque les concentrations en nutriments diminuent (Sharma et Gothwal, 2017). Par ailleurs, une forte croissance mycélienne des souches témoins pour les quatre espèces de *Phytophthora* a été observée comparée à celle des différentes confrontations entre *T. asperellum* et chaque espèce de *Phytophthora*. De manière particulière, une croissance plutôt rapide a été observée pour *P. cinamomi*, *P. nicotianae* et *P. palmivora*. Pour *P. citrophthora* on a observé une croissance plutôt lente.

L'activité inhibitrice de plusieurs espèces de *Trichoderma* sur les champignons phytopathogènes a été largement démontrée (Ezziyani et al., 2007; Mbarga et al., 2014; Nawaz et al., 2018; Zapata-Sarmiento et al., 2020; Degani et Dor, 2021). Dans cette étude, le potentiel biocontrôle des souches de *T. asperellum* (PR11 et PR12) sur *P. cinnamomi*, *P. citrophthora*, *P. nicotianae* et *P. palmivora* a été démontré *in vitro*. Les travaux de Mbarga et al. (2012) ont montré des taux d'inhibition de l'ordre de 60 %. Dans la présente étude, des taux d'inhibition de 62 et 63 % (*T. asperellum* PR11 sur *P. citrophthora* et *P. palmivora*), et même 69 et 75 % pour ces mêmes agents pathogènes avec la souche *T. asperellum* PR12 ont été obtenus. En effet, Tondje et al. (2007) et Tchameni et al. (2011) ont obtenu des résultats similaires dans leurs travaux qui portaient sur la lutte biologique contre les espèces de *Phytophthora* qui causent la pourriture brune des cabosses de cacao. Dans la présente étude, il a été montré que la souche de *T. asperellum* PR12 était plus agressive que la

souche PR11. Cette souche a même complètement inhibé la croissance mycélienne de *P. nicotianae* et *P. palmivora* au jour 6 après inoculation.

La conservation et l'amélioration des biopesticides naturels tels que les champignons antagonistes est l'une des principales composantes de la lutte intégrée. Les fongicides microbiens tels que les espèces de *Trichoderma* sont de plus en plus utilisés dans la lutte biologique car ils sont généralement spécifiques, semblent non toxiques pour les insectes bénéfiques, les animaux et les humains, et ne posent pas de problèmes de résidus ou de risques environnementaux (Sharma et Gothwal, 2017; Tariq et al., 2020). La promotion de ces biopesticides est donc une aubaine pour les pays en voie de développement, qui non seulement sont encore largement dépendants de l'agriculture, mais sont également confrontés à des enjeux globaux, notamment ceux liés à la pollution par les pesticides chimiques (Sharma et al., 2019). Les résultats présentés dans cette étude démontrent que *Trichoderma asperellum* peut limiter significativement la propagation de *Phytophthora* dans la production des agrumes. Cependant, il est essentiel de réaliser des tests *in vivo* et *in situ* pour confirmer ces résultats.

Le deuxième volet de cet objectif a permis de tester l'effet des AgNP à base d'extrait aqueux de *T. diversifolia*. Les résultats ont montré une forte efficacité de cet agent de lutte contre toutes les espèces de *Phytophthora* identifiées comme agent responsables de la gommosse. *Tithonia diversifolia* est une plante rudérale dont les propriétés pesticides ont été prouvées (Awere et al., 2021; Chege et Kimaru, 2021). Dans diverses régions et pays dans les tropiques, cette espèce a été reconnue pour le contrôle de diverses pathologies végétales (Ajao et Moteetee, 2017; Dada et al., 2018; Ferreira Farias et al., 2019; Green et al., 2019; 2020.). Cependant, à notre connaissance, aucune étude montrant l'effet fongicide de *T. diversifolia* sur *Phytophthora* n'avait encore été faite. Dans cette étude, il a été montré que les AgNPs synthétisées à partir de l'extrait aqueux de *T. diversifolia* inhibent efficacement les quatre espèces de *Phytophthora* responsables de la gommosse des agrumes. Les espèces de *Phytophthora* étant reconnues pour développer une résistance aux fongicides synthétiques en subissant rapidement des mutations génétiques (Ali et al., 2015), la disponibilité d'AgNPs qui peuvent fournir une protection à large spectre fournirait des outils alternatifs pour contrôler les maladies causées par *Phytophthora*.

Des études précédentes ont montré la synthèse de AgNPs à partir de *T. diversifolia* (Dada et al., 2018; Tran et al., 2013) et des nanoparticules de fer II (Chebet et al., 2020). La méthode de synthèse utilisée dans cette étude permet d'obtenir des AgNPs à partir de T_{EA} en moins de cinq minutes, et de les conserver de manière stable pendant plus de six mois. Les AgNPs synthétisées ont en effet été conservées dans un endroit frais pendant 8 mois, les AgNPs de cette étude ont été observées autour de 426 nm après 5 minutes. Dans le cas des travaux de Tran et al. (2013) les

auteurs ont observé un pic d'absorption à 450 nm après une heure, avec une AgNP synthétisé avec 0,01 M AgNO₃ à partir de Td_{EA}. De plus, d'autres travaux ont montré que, les AgNP ont des pics bien connus autour de 385- 450 nm (Bibi et al., 2021; Ma et al., 2016). Les résultats obtenus corroborent ceux de Saha et al. (2017) qui ont fait une synthèse biogénique et ont testé l'efficacité catalytique des nanoparticules d'argent à base d'extraits d'écorces de fruits de *Citrus macroptera*.

Les résultats de cette étude ont montré une réduction significative de la croissance mycélienne de *P. cinnamomi*, *P. citrophthora*, *P. nicotianae* et *P. palmivora*. Les résultats ont montré que, les traitements avec les AgNP réduisaient significativement la croissance mycélienne. Ces traitements avec des AgNP ont montré de meilleurs résultats par rapport au fongicide de référence et à l'extrait brut de *T. diversifolia*. Le fongicide de référence utilisé ici est un fongicide systémique largement utilisé pour lutter contre les *Phytophthora* inféodés au cacaoyer au Cameroun (Ndoungue et al., 2018; Tadam et al., 2018), ainsi que contre une série d'autres espèces de *Phytophthora* dans le monde (Babadoost et al., 2015; Kumi et al., 2020). Ce fongicide chimique a montré une efficacité limitée dans la réduction de la croissance mycélienne de *P. cinnamomi*, *P. citrophthora* et *P. nicotianae*, par rapport à tous les traitements à base de AgNP. Ceci a été confirmé par le taux d'efficacité des différents traitements contre *P. cinnamomi* et *P. nicotianae*, qui montre qu'il existe une différence significative entre le fongicide de référence et le Td_{EA} d'une part, et les traitements AgNPs d'autre part. On peut donc affirmer ici que les AgNP peuvent contrôler significativement les agents pathogènes étudiés. Giannousi et al. (2013) ont également montré l'inhibition de *P. infestans* par des NPs de cuivre. Les résultats obtenus dans cette étude doivent cependant être confirmés par des travaux *in vivo* et *in situ* par le traitement d'agrumes attaqués par le *Phytophthora*. Cela permettrait également de développer des dosages adaptés aux surfaces à traiter tel que fait par Elmer et al. (2018).

III.2.5. Synthèse des résultats

La nécessité de mettre au point une stratégie de gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* est un impératif pour la production durable des agrumes (Brazier, 1998; Erwin and Ribeiro, 1996). La mise à disposition d'une approche innovante par la conception de modèle de systèmes de cultures basés sur les interactions biophysiques au sein des agrosystèmes et optimisées par l'usage de biopesticides est de ce fait indispensable. Dans le cadre de cette étude, cette stratégie a été abordée dans une approche holistique mettant l'accent sur quatre points essentiels donc, la maîtrise de l'agent pathogène, l'environnement agroécologique, la production de biopesticides et le système de production. La figure 45 ci-dessous présente un modèle de gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun.

Pour ce qui est de la connaissance des agents pathogènes, il est impératif d'identifier les espèces de *Phytophthora* responsables de la gommose dans les sites et les vergers. En effet, vue la grande diversité des espèces d'agents pathogènes, il est nécessaire de surveiller l'activité et l'évolution des agents pathogènes dans les exploitations. Il est de ce fait utile de connaître les cycles de vie des espèces impliquées et de maîtriser leur degré de sensibilité vis-à-vis des espèces d'agrumes cultivées. Ceci appelle donc à prendre des mesures préventives lors de l'implantation des nouveaux vergers.

Cette action préventive implique également la maîtrise des variables microclimatiques ou encore agroécologiques propres au site de production des agrumes. Il est donc impératif de connaître les conditions environnementales du futur site d'implantation du verger afin de prendre en compte les spécificités des variables pédologiques et climatiques ainsi que leur interaction avec les différentes espèces de *Phytophthora*. Ceci appelle également à un choix minutieux des espèces d'agrumes. L'adoption des pratiques culturales adéquates est également utile pour une gestion intégrée de la gommose. L'application de ces stratégies prophylactiques requiert davantage l'intervention de l'agrumiculteur.

Les caractères cosmopolite et saprophyte des *Phytophthora* rendent difficiles et inefficaces les stratégies de lutttes conventionnelles. Dans cette étude, il est proposé d'adopter l'utilisation des bio-fongicides pour lutter contre les *Phytophthora* responsables de la gommose. Les espèces fongiques antagonistes telles que *Trichoderma* ont montré une efficacité de près de 75 % contre les *Phytophthora* spp. isolées dans ce travail. Quant aux nanoparticules à base d'extraits aqueux de *Tithonia diversifolia*, une efficacité de plus de 95 % a été observée. Ces produits sont donc capables de lutter efficacement contre la gommose. De plus, ils représentent une opportunité du fait de leur caractère biologique et peuvent contribuer à limiter l'usage des pesticides chimiques.

Le système de production agricole conventionnel a montré ses limites et les agrosystèmes plurispécifiques plus ou moins complexes sont une voie à explorer pour faire face aux enjeux globaux (Dornbush and von Haden, 2017). Les résultats présentés dans cette étude ont démontré à suffisance le potentiel des vergers associés ou encore des systèmes agroforestiers complexes, à réguler naturellement la gommose. Ces systèmes sont donc recommandés pour la production des agrumes. Dans le cas des systèmes agroforestiers complexes avec une strate supérieure, il est recommandé de maintenir un ombrage dense au-dessus des agrumes. Une structure spatiale régulière est vivement recommandée avec des écartements de l'ordre de 12 m comme le recommandait déjà Ndo (2011).

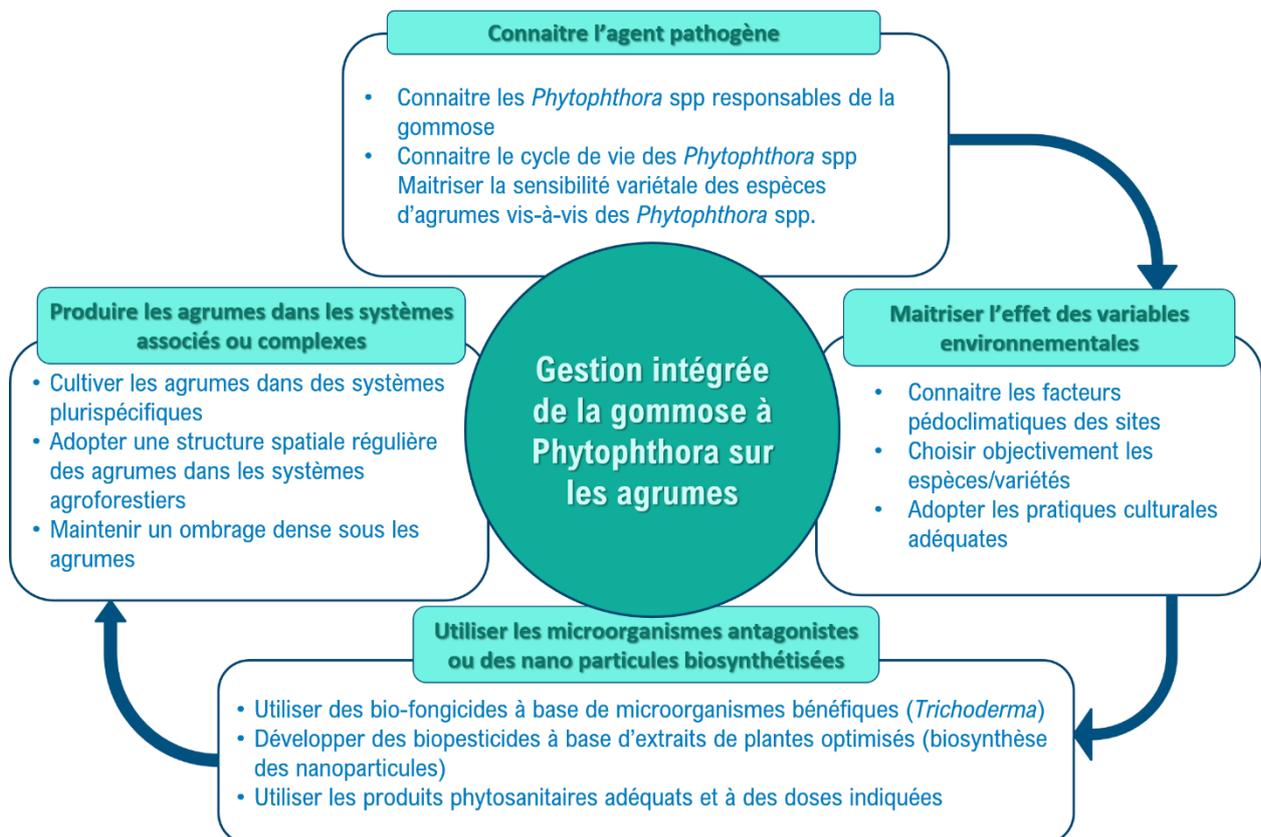


Figure 45. Modèle de gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes

CHAPITRE IV. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

IV.1. Conclusion et recommandations

Cette étude a permis de mettre en lumière l'impact de la gommose des agrumes causée par les *Phytophthora* dans les zones de forêts humides du Cameroun. Les activités conduites dans les localités de Kédia, Goura, Bokito, Evdoula, Bikok, Boumnyebel, Makondo, Njombé et Muyuka avaient visé à identifier les principaux facteurs de risque épidémiologique de la gommose afin d'amorcer une stratégie de gestion ciblée, adaptée au contexte socio-économique local et facilement intégrable aux systèmes de production existants. Le premier objectif spécifique était de caractériser la situation épidémiologique de la gommose dans la zone d'étude. Les résultats ont montré que, IG varie significativement selon les sites d'étude, les systèmes de production, les espèces et l'âge des agrumes. Sur la base de leurs caractères morpho-cultureux, les espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes dans les sites d'étude sont *P. citrophthora*, *P. nicotianae*, *P. palmivora*, et *P. cinnamomi*. *P. citrophthora* est l'espèce prédominante avec une prévalence de 45 %. *P. nicotianae* et *P. palmivora* étaient prévalents chacun à 22 %. Quant à *P. cinnamomi*, ce n'est que dans le site de Makondo que cette espèce a été trouvée avec une prévalence de 11 %. Cette diversité spécifique des espèces de *Phytophthora* doit être prise en compte dans la mise au point des stratégies de lutte.

Concernant l'effet des caractéristiques structurales des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (SAFC) sur IG, les résultats ont montré que le taux d'ombrage reçu par les agrumes varie au sein des parcelles, entre les parcelles d'un même site ainsi qu'entre les sites d'étude. Un effet antagoniste a été mis en évidence entre le taux d'ombrage et IG sur les agrumes. S'agissant de la structure spatiale, il a été montré que les agrumes sont plantés selon une distribution spatiale aléatoire à tendance soit agrégée soit régulière. Les parcelles dans lesquelles les agrumes ont une structure spatiale agrégée ou aléatoire ont montré une plus forte intensité de la gommose comparées à celles dans lesquelles les agrumes avaient une structure spatiale régulière. Par ailleurs, il a été trouvé dans cette étude que, lorsque les agrumes sont plantés suivant une structure spatiale régulière et recevant un taux d'ombrage important, ils sont significativement moins attaqués par la gommose, comparés à ceux plantés suivant une structure spatiale agrégée et ne recevant pas assez d'ombrage. L'étude des raisons de choix des structures spatiales des agrumes dans les SAFC a montré que, les structures spatiales réelles observées dans les SAFC ne sont pas toujours celles souhaitées par les agriculteurs. Cependant, ce sont les facteurs intrinsèques au système, tels que la biodiversité, les espèces et le nombre de certains individus qui orientent les structures spatiales réellement adoptées. Il est donc impératif de mieux renseigner les agriculteurs de l'implication et de l'importance des caractéristiques structurales du système agroforestier sur les interactions

biophysiques qui s'y déroulent. L'optimisation desdites interactions offrent des opportunités en termes de régulations des bioagresseurs et conséquemment une réduction de l'usage des produits phytosanitaires de synthèse.

Les relations existantes entre les constituants physicochimiques du sol, les conditions climatiques et les pratiques agronomiques d'une part et l'intensité de l'IG d'autre part, ont été étudiées sur trois espèces d'agrumes. Après une série de tris par la méthode de régression PLS, seules 21 des 39 variables de réponse initialement considérées ont été retenues comme ceux déterminant IG. Cependant, dans le modèle final, la température, les précipitations, l'humidité du sol, l'humidité relative, les traitements insecticides, les traitements phytosanitaires mixtes, l'argile, le limon fin et la matière organique du sol ont été retenus comme facteurs de risque épidémiologique de la gommose. Les quatre espèces de *Phytophthora* ont par ailleurs montré des comportements assez variés vis-à-vis de ces variables explicatives. Il ressort donc de ces résultats que l'épidémie de la gommose est soumise aux aléas d'ordre environnementaux, mais aussi à la forte diversité des agents pathogènes. La prise en compte desdits aléas est primordiale non seulement pour l'implantation de nouveaux vergers, mais aussi, dans la mise au point des stratégies de lutte.

Les résultats des tests bio-fongicides avec les souches PR11 et PR12 de *T. asperellum* ont montré que la colonisation du mycélium parasite par les souches antagonistes varie considérablement selon la souche et l'agent pathogène en présence. Pour les tests de bio-efficacité des AgNP sur les espèces de *Phytophthora*, les résultats ont montré une réduction significative de la croissance mycélienne des espèces de *Phytophthora* avec des AgNP par rapport au fongicide de référence et à l'extrait aqueux de *T. diversifolia*. Face à *P. cinnamomi*, *P. citrophthora* et *P. nicotianae*, on a enregistré une efficacité de 80 % avec le traitement '75 % AgNO₃+25 % Ext'. Cependant, vis-à-vis de *P. palmivora*, tous les traitements à base de nanoparticules de nitrate d'argent ont montré une efficacité d'environ 95 %. Le potentiel bio-fongicides de ces produits et microorganismes est à investiguer. Ils représentent dès lors une alternative aux fongicides de synthèse, et contribueraient à mettre sur pied une production agrumicole écologiquement acceptable et économique viable.

IV.2. Perspectives

Cette étude a permis de faire des avancées considérables sur notre compréhension de l'épidémie de la gommose sur les agrumes au Cameroun et même dans la sous-région. Cependant, les activités doivent se poursuivre notamment, pour faire une identification biomoléculaire des souches de *Phytophthora* obtenues. Ces analyses permettront non seulement de confirmer le statut spécifique desdites souches mais pourrait permettre de mettre en lumière des espèces encore non identifiées. Les agrumes étant principalement cultivés au Cameroun dans des SAFC, il est indispensable

d'étudier la dynamique des espèces de *Phytophthora* en relation avec la diversité des hôtes potentiels dans ces systèmes de culture. Ceci permettra non seulement d'élucider les interrelations hôte-pathogène entre les *Phytophthora* spp. et les hôtes potentiels dans l'agrosystème, mais aussi de comprendre l'effet de la diversité floristique et des caractéristiques structurelles sur le potentiel pathogène des populations de *Phytophthora*.

Par ailleurs, cette étude a permis de mettre en évidence le potentiel bio-fongicide des AgNP et des espèces fongiques du genre *Trichoderma*. Cependant, les activités s'étant limitées à des observations *in vitro*, il est impératif de poursuivre ces recherches *in vivo* et *in situ*, afin de mieux cerner l'effet de ces agents de lutte biologique. De plus, les souches de *Trichoderma* utilisées ici ayant été isolées dans la rhizosphère du cacaoyer, il serait également approprié de faire des isollements de microorganismes antagonistes directement dans la rhizosphère des agrumes.

BIBLIOGRAPHIE

- A, V., 1974. [The foot rot of citrus in Morocco]. [French]. Al Awamia.
- Abdulai, I., Jassogne, L., Graefe, S., Asare, R., Van Asten, P., Läderach, P., Vaast, P., 2018. Characterization of cocoa production, income diversification and shade tree management along a climate gradient in Ghana. PLoS ONE 13, 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195777>
- Abobatta, W., 2019. Potential impacts of global climate change on citrus cultivation. MOJ Ecol. Environ. Sci. 4, 308–312. <https://doi.org/10.15406/mojes.2019.04.00168>
- Adenaike, O., Abakpa, G.O., 2021. Antioxidant Compounds and Health Benefits of Citrus Fruits. Eur. J. Nutr. Food Saf. 65–74. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2021/v13i230376>
- Agustí, M., Mesejo, C., Reig, C., Martínez-Fuentes, A., 2014. Citrus Production, in: Dixon, G.R., Aldous, D.E. (Eds.), Horticulture: Plants for People and Places, Volume 1. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 159–195. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8578-5_6
- Ajao, A.A., Moteetee, A.N., 2017. *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray. (Asteraceae: Heliantheae), an invasive plant of significant ethnopharmacological importance: A review. South Afr. J. Bot. 113, 396–403. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.09.017>
- Akoutou, E., Ndo, E., Bieng, M.-A., Ambang, Z., Manga, B., Cilas, C., Manga, M., N.L, B., 2017. Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and *Phytophthora* foot rot disease of citrus severity. Agrofor. Syst. 93. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0140-3>
- Akoutou Mvondo, E., Ndo, E.G.D., Ngo Bieng, M.-A., Ambang, Z., Bella Manga, Cilas, C., Tsouga Manga, M.L., Bidzanga Nomo, L., 2019. Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and *Phytophthora* foot rot disease of citrus severity. Agrofor. Syst. 93, 493–502. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0140-3>
- Akoutou Mvondo, E., Ndo, E.G.D., Tsouga Manga, M.L., Aba'ane, C.L., Abondo Bitoumou, J., Manga, B., Bidzanga Nomo, L., Ambang, Z., Cilas, C., 2020a. Effects of complex cocoa-based agroforests on citrus tree decline. Crop Prot. 130, 105051. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105051>
- Akoutou Mvondo, E., Ndo, E.G.D., Tsouga Manga, M.L., Aba'ane, C.L., Abondo Bitoumou, J., Manga, B., Bidzanga Nomo, L., Ambang, Z., Cilas, C., 2020b. Effects of complex cocoa-based agroforests on citrus tree decline. Crop Prot. 130, 105051. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105051>
- Alcon, F., Marín-Miñano, C., Zabala, J.A., De-Miguel, M.D., Martínez-Paz, J.M., 2020. Valuing diversification benefits through intercropping in Mediterranean agroecosystems: A choice experiment approach. Ecol. Econ. 171, 106593. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106593>
- Ali, M., Kim, B., Belfield, K.D., Norman, D., Brennan, M., Ali, G.S., 2015. Inhibition of *Phytophthora parasitica* and *P. capsici* by Silver Nanoparticles Synthesized Using Aqueous Extract of *Artemisia absinthium*. Phytopathology® 105, 1183–1190. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-15-0006-R>
- Ali, S., Bruce, S., Ana I, V., Aaron J, P., Patricia, L., Asiye, S., 2018. In vitro evaluation of eight plant essential oils for controlling *Colletotrichum*, *Botryosphaeria*, *Fusarium* and *Phytophthora* fruit rots of avocado, mango and papaya. Plant Prot. Sci. 54, 153–162. <https://doi.org/10.17221/49/2017-PPS>
- Alvarez, L.A., Vicent, A., De la Roca, E., Bascón, J., Abad-Campos, P., Armengol, J., García-Jiménez, J., 2007. Branch cankers on citrus trees in Spain caused by *Phytophthora citrophthora*. Plant Pathol. 0, 070921225609005-??? <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01702.x>
- Alvarez, L.A., Vicent, A., Roca, E.D. la, Bascón, J., Abad-Campos, P., Armengol, J., García-Jiménez, J., 2008. Branch cankers on citrus trees in Spain caused by *Phytophthora citrophthora*. Plant Pathol. 57, 84–91. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01702.x>

- Andrade-Hoyos, P., Silva-Rojas, H.V., Romero-Arenas, O., 2020. Endophytic *Trichoderma* Species Isolated from *Persea americana* and *Cinnamomum verum* Roots Reduce Symptoms Caused by *Phytophthora cinnamomi* in Avocado. *Plants* 9, 1220. <https://doi.org/10.3390/plants9091220>
- Andres, C., Blaser, W.J., Dzahini-Obiatey, H.K., Ameyaw, G.A., Domfeh, O.K., Awiagah, M.A., Gattinger, A., Schneider, M., Offei, S.K., Six, J., 2018. Agroforestry systems can mitigate the severity of cocoa swollen shoot virus disease. *Agric. Ecosyst. Environ.* 252, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.031>
- Armengot, L., Ferrari, L., Milz, J., Velásquez, F., Hohmann, P., Schneider, M., 2020. Cacao agroforestry systems do not increase pest and disease incidence compared with monocultures under good cultural management practices. *Crop Prot.* 130. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105047>
- Asim, M., Iqbal, Z., Raza, W., Ahmad, S., Ghazanfar, M., Raza, M., 2019. Study of *Phytophthora* Associated with Citrus Decline 5, 404–409.
- Aulong, S., Dury, S., Temple, L., 2000. Dynamique et structure floristique des agroforets a agrumes au centre du Cameroun. *Fruits* 55, 103–114.
- Awere, C.A., Githae, E.W., Gichumbi, J.M., 2021. Phytochemical analysis and antifungal activity of *Tithonia diversifolia* and *Kigelia africana* extracts against *Fusarium oxysporum* in tomato. *Afr. J. Agric. Res.* 17, 726–732. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15050>
- Babadoost, M., Pavon, C., Islam, S.Z., Tian, D., 2015. *Phytophthora* blight (*Phytophthora capsici*) of pepper and its management, in: Hale, C., Hunter, D., Roberts, W., Ikin, R., McMaugh, S. (Eds.), XXIX International Horticultural Congress on Horticulture, *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, pp. 61–66. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1105.9>
- Babin, R., Anikwe, J.C., Dibog, L., Lumaret, J.-P., 2011. Effects of cocoa tree phenology and canopy microclimate on the performance of the mirid bug *Sahlbergella singularis*: Two factors affecting cocoa mirid performance. *Entomol. Exp. Appl.* 141, 25–34. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2011.01164.x>
- Bahukhandi, K.D., Kamboj, N., Kamboj, V. (Eds.), 2022. Environmental Pollution and Natural Resource Management, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05335-1>
- Balaji, D.S., Basavaraja, S., Deshpande, R., Mahesh, D.B., Prabhakar, B.K., Venkataraman, A., 2009. Extracellular biosynthesis of functionalized silver nanoparticles by strains of *Cladosporium cladosporioides* fungus. *Colloids Surf. B Biointerfaces* 68, 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.09.022>
- Barboza, E.A., Cabral, C.S., Rossato, M., Luz, E.D.M.N., Reis, A., 2020. Morphologic, molecular, and pathogenic characterization of *Phytophthora palmivora* isolates causing flower rot on azalea. *Braz. J. Microbiol.* 51, 1493–1503. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00300-6>
- Barrios, E., Valencia, V., Jonsson, M., Brauman, A., Hairiah, K., Mortimer, P.E., Okubo, S., 2018. Contribution of trees to the conservation of biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes. *Int. J. Biodivers. Sci. Ecosyst. Serv. Manag.* 14, 1–16. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1399167>
- Bassanezi, R.B., Lopes, S.A., de Miranda, M.P., Wulff, N.A., Volpe, H.X.L., Ayres, A.J., 2020. Overview of citrus huanglongbing spread and management strategies in Brazil. *Trop. Plant Pathol.* 45, 251–264. <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00343-y>
- Bayaga, H.N., Guedje, N.M., Biye, E.H., 2017. Approche ethnobotanique et ethnopharmacologique des plantes utilisées dans le traitement traditionnel de l'ulcère de Buruli à Akonolinga (Cameroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 11, 1523. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i4.10>
- Bennett, E.M., Baird, J., Baulch, H., Chaplin-Kramer, R., Fraser, E., Loring, P., Morrison, P., Parrott, L., Sherren, K., Winkler, K.J., Cimon-Morin, J., Fortin, M.J., Kurylyk, B.L., Lundholm, J., Poulin, M., Rieb, J.T., Gonzalez, A., Hickey, G.M., Humphries, M., Kc,

- K.B., Lapen, D., 2021. Ecosystem services and the resilience of agricultural landscapes. *Adv. Ecol. Res.* 1–43. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2021.01.001>
- Bhat, R., Ganachari, S., Deshpande, R., Ravindra, G., Venkataraman, A., 2013. Rapid Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using Areca Nut (*Areca catechu*) Extract Under Microwave-Assistance. *J. Clust. Sci.* 24, 107–114. <https://doi.org/10.1007/s10876-012-0519-2>
- Bibi, S., Afzal, Z., El-Sayed, A., Ali, G., 2021. Study of silver nanoparticle effects on some molecular responses and metabolic pathways of *Phytophthora parasitica*.
- Biyon, J.B.N., Tchoue, Y.D.W., Nnanga, J.F., Iyodi, A.B., Mokake, S.E., Désiré, T.V., Biyon, J.B.N., Tchoue, Y.D.W., Nnanga, J.F., Iyodi, A.B., Mokake, S.E., Désiré, T.V., 2022. Biodiversity and parasitism of Loranthaceae on citrus cultivated in the Mongo department. *GSC Adv. Res. Rev.* 11, 037–044. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2022.11.2.0122>
- Bose, T., Hulbert, J.M., Burgess, T.I., Paap, T., Roets, F., Wingfield, M.J., 2021. Two novel *Phytophthora* species from the southern tip of Africa. *Mycol. Prog.* 20, 755–767. <https://doi.org/10.1007/s11557-021-01702-y>
- Boudreau, M., Shew, B., Andrako, L., 2015. Impact of Intercropping on Epidemics of Groundnut Leaf Spots: Defining Constraints and Opportunities through a Seven-year Field Study. *Plant Pathol.* 65. <https://doi.org/10.1111/ppa.12440>
- Bowman, K.D., Joubert, J., 2020. Chapter 6 - Citrus rootstocks, in: Talon, M., Caruso, M., Gmitter, F.G. (Eds.), *The Genus Citrus*. Woodhead Publishing, pp. 105–127. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00006-1>
- Brazier, C., 1998. *Phytophthora Diseases Worldwide*. By D. C. Erwin and O. K. Ribeiro. St Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society (1996), pp. 562, £90. ISBN 0-89054-212-0. *Exp. Agric.* 34, 125–130. <https://doi.org/10.1017/S001447979825109X>
- Brentu, F.C., Cornelius, E.W., Lawson, L.E.V., Oduro, K.A., Vicent, A., 2013. First Report of *Pseudocercospora angolensis* Causing Fruit and Leaf Spot of Citrus in Ghana. *Plant Dis.* 97, 1661–1661. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-13-0615-PDN>
- Brown, D., 2004. The effects of disease dispersal and host clustering on the epidemic threshold in plants. *Bull. Math. Biol.* 66, 341–371. <https://doi.org/10.1016/j.bulm.2003.08.006>
- Byrne, I., Healy, M.G., Fenton, O., Tuohy, P., 2023. Assessment of the hydraulic and filter performance of different drainage stone aggregates to elucidate an optimum size range for use in clay-textured soils. *Agric. Water Manag.* 278, 108164. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108164>
- Cacciola, S.O., Lio, G.M. di S., 2008a. Management Of Citrus Diseases Caused By *Phytophthora* Spp, in: Ciancio, A., Mukerji, K.G. (Eds.), *Integrated Management of Diseases Caused by Fungi, Phytoplasma and Bacteria, Integrated Management of Plant Pests and Diseases*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 61–84. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8571-0_4
- Cacciola, S.O., Lio, G.M. di S., 2008b. Management Of Citrus Diseases Caused By *Phytophthora* Spp. *Integr. Manag. Dis. Caused Fungi Phytoplasma Bact.* 61–84. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8571-0_4
- Cai, J., Xiong, J., Hong, Y., Hu, R., 2021. Pesticide overuse in apple production and its socioeconomic determinants: Evidence from Shaanxi and Shandong provinces, China. *J. Clean. Prod.* 315, 128179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128179>
- Cameroon Citrus fruit production, 1961-2020 - knoema.com [WWW Document], n.d. . Knoema. URL <https://knoema.com/atlas/Cameroon/topics/Agriculture/Crops-Production-Quantity-tonnes/Citrus-fruit-production> (accessed 7.20.21).
- Chan, A.H.Y., Barnes, C., Swinfield, T., Coomes, D.A., 2021. Monitoring ash dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*) in British forests using hyperspectral remote sensing. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 7, 306–320. <https://doi.org/10.1002/rse2.190>
- Chaudhary, S., Laughlin, D.A., Setamou, M., da Graça, J.V., Kunta, M., Alabi, O.J., Crosby, K.M., Ong, K.L., Ancona, V., 2020. Incidence, Severity, and Characterization of *Phytophthora*

- Foot Rot of Citrus in Texas and Implications for Disease Management. *Plant Dis.* 104, 2455–2461. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-19-1493-RE>
- Chebet, H., Kinyua, J., Kareru, P., Gitaari, N., 2020. Characterization and Antibacterial Potential of *Tithonia diversifolia* Extract and Its Iron II Nanoparticles. *Int. J. Biochem. Res. Rev.* 101–107. <https://doi.org/10.9734/ijberr/2020/v29i930229>
- Chege, E.W., Kimaru, S.K., 2021. Effects of *Tithonia diversifolia* and *Allium sativum* extracts on *Colletotrichum gloeosporioides*, the causal agent of anthracnose in avocado. *Life* 14, 209–214. <https://doi.org/10.1080/26895293.2021.1904008>
- Chen, J., Shen, Y., Chen, C., Wan, C., 2019. Inhibition of Key Citrus Postharvest Fungal Strains by Plant Extracts In Vitro and In Vivo: A Review. *Plants* 8, 26. <https://doi.org/10.3390/plants8020026>
- Chen, Y., Barzee, T.J., Zhang, R., Pan, Z., 2019a. Chapter 9 - Citrus, in: Pan, Z., Zhang, R., Zicari, S. (Eds.), *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*. Academic Press, pp. 217–242. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00009-5>
- Chen, Y., Barzee, T.J., Zhang, R., Pan, Z., 2019b. Citrus, in: *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*. Elsevier, pp. 217–242. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00009-5>
- Chet, I., Inbar, J., 1994. Biological control of fungal pathogens. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 48, 37–43. <https://doi.org/10.1007/BF02825358>
- Choudhari, R., Gade, R., Lad, R., Jagarlapudi, A., Phanindra, K., 2018. Epidemiological Relations to *Phytophthora* Spp. Causing Citrus Root Rot in Nagpur Mandarin 6, 406–417.
- Cocoza, C., Abdeldaym, E.A., Brunetti, G., Nigro, F., Traversa, A., 2021. Synergistic effect of organic and inorganic fertilization on the soil inoculum density of the soilborne pathogens *Verticillium dahliae* and *Phytophthora* spp. under open-field conditions. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 8, 24. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00223-w>
- Cooke, D.E.L., Drenth, A., Duncan, J.M., Wagels, G., Brasier, C.M., 2000. A molecular phylogeny of *phytophthora* and related oomycetes. *Fungal Genet. Biol.* 30, 17–32. <https://doi.org/10.1006/fgbi.2000.1202>
- Crous, P.W., Hawksworth, D.L., Wingfield, M.J., 2015. Identifying and Naming Plant-Pathogenic Fungi: Past, Present, and Future. *Annu. Rev. Phytopathol.* 53, 247–267. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120245>
- Dada, A.O., Inyinbor, A.A., Idu, E.I., Bello, O.M., Oluyori, A.P., Adelani-Akande, T.A., Okunola, A.A., Dada, O., 2018. Effect of operational parameters, characterization and antibacterial studies of green synthesis of silver nanoparticles using *Tithonia diversifolia*. *PeerJ* 6, e5865. <https://doi.org/10.7717/peerj.5865>
- Danièle, N.E.G., Etienne, A.M., 2021. *Integrated Management Approach to Citrus Fungal Diseases by Optimizing Cocoa-Based Agroforests Structural Characteristics*, Citrus - Research, Development and Biotechnology. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95571>
- Dardonville, M., Bockstaller, C., Villerd, J., Therond, O., 2022. Resilience of agricultural systems: biodiversity-based systems are stable, while intensified ones are resistant and high-yielding. *Agric. Syst.* 197, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103365>
- Das, A.K., Nerkar, S., Thakre, N., Kumar, A., 2017. First report of an atypical strain of *Phytophthora inundata* causing Kinnow mandarin decline in India. *Can. J. Plant Pathol.* 39, 365–372. <https://doi.org/10.1080/07060661.2017.1364296>
- Dawson, N., Martin, A., Sikor, T., 2016. Green Revolution in Sub-Saharan Africa: Implications of Imposed Innovation for the Wellbeing of Rural Smallholders. *World Dev.* 78, 204–218. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.008>
- De Corato, U., Viola, E., Arcieri, G., Valerio, V., Zimbardi, F., 2016. Use of composted agro-energy co-products and agricultural residues against soil-borne pathogens in horticultural soil-less systems. *Sci. Hortic.* 210, 166–179. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.027>

- Degani, O., Dor, S., 2021. Trichoderma Biological Control to Protect Sensitive Maize Hybrids against Late Wilt Disease in the Field. *J. Fungi* 7, 315. <https://doi.org/10.3390/jof7040315>
- Degrande, A., Schreckenber, K., Mbosso, C., Anegebe, P., Okafor, V., Kanmegne, J., 2006. Farmers' fruit tree-growing strategies in the humid forest zone of Cameroon and Nigeria. *Agrofor. Syst.* 67, 159–175. <https://doi.org/10.1007/s10457-005-2649-0>
- Deheuvels, O., Avelino, J., Somarriba, E., Malezieux, E., 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 149, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.003>
- Delshad, D., Mostowfizadeh-Ghalamfarsa, R., Safaiefarahani, B., 2020. Potential host range and the effect of temperature on the pathogenicity of *Phytophthora pseudocryptogea* and its close relatives. *J. Plant Pathol.* 102, 753–763. <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00501-w>
- Devaux, A., Haverkort, A.J., 1987. The Effects of Shifting Planting Dates and Mulching on Late Blight (*Phytophthora infestans*) and Drought Stress of Potato Crops Grown under Tropical Highland Conditions. *Exp. Agric.* 23, 325–333. <https://doi.org/10.1017/S001447970001721X>
- Dornbush, M.E., von Haden, A.C., 2017. Intensified Agroecosystems and Their Effects on Soil Biodiversity and Soil Functions, in: *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*. Elsevier, pp. 173–193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805317-1.00008-7>
- Duan, C.-H., Riley, M.B., Jeffers, S.N., 2008. Characterization of *Phytophthora cinnamomi* populations from ornamental plants in South Carolina, USA. *Arch. Phytopathol. Plant Prot.* 41, 14–30. <https://doi.org/10.1080/03235400600628054>
- Dubey, S., Jain, S.K., 2016. Effect of Humidity on Fungal Deteriogens of Ancient Monuments , International Research Effect of Humidity on Fungal Deteriogens of Ancient Monuments. *Int. Res. J. Biol. Sci.* 3, 84–86.
- Duniway, J.M., 1983. Role of physical factors in the development of *Phytophthora* diseases.
- Durand-Bessart, C., Tixier, P., Quinteros, A., Andreotti, F., Rapidel, B., Tauvel, C., Allinne, C., 2020. Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. *Crop Prot.* 133, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137>
- Dwiastuti, M.E., 2020. Citrus foot rot disease (*Phytophthora* spp.) control in Indonesia using good agricultural practices efforts green agroindustry. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 484. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/484/1/012097>
- Easton, Z.M., 2021. Soil and Soil Water Relationships.
- Elmer, W., Ma, C., White, J., 2018. Nanoparticles for plant disease management. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health, Nanomaterials in plants* 6, 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.08.002>
- Endes, A., Kayim, M., 2022. The Effect of Temperature and Culture Media on Mycelial Growth of *Phytophthora citrophthora* Causing Gummosis, Crown and Root Rot on Lemon Seedlings. *J. Turk. Phytopathol.* 51, 21–26.
- Eriksson, L., Byrne, T., Johansson, E., Trygg, J., Vikström, C., 2013. Multi- and Megavariate Data Analysis Basic Principles and Applications. Umetrics Academy.
- Erwin, D.C., Lucas, J.A., Shattock, R.C., Shaw, D.S., Cooke, L.R., 1992. *Phytophthora*. *Mycologia* 84, 608. <https://doi.org/10.2307/3760340>
- Erwin, D.C., Ribeiro, O.K., 1996. *Phytophthora* diseases worldwide. *Phytophthora Dis. Worldw.*
- Esposito Vinzi, V., Chin, W.W., Henseler, J., Wang, H., 2010. Handbook of partial least squares: Concepts, methods and applications. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.
- Ezziyyani, M., Requena, M.E., Egea-Gilabert, C., Candela, M.E., 2007. Biological Control of *Phytophthora* Root Rot of Pepper Using *Trichoderma harzianum* and *Streptomyces rochei* in Combination. *J. Phytopathol.* 155, 342–349. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2007.01237.x>
- Fawcett, H.S., 1936. Citrus diseases and their control. *Citrus Dis. Their Control*.

- Ferguson, L., Haviland, D., 2016. Pistachio Production Manual. UCANR Publications.
- Ferreira Farias, A.L., Lobato Rodrigues, A.B., Lopes Martins, R., de Menezes Rabelo, É., Ferreira Farias, C.W., Moreira da Silva de Almeida, S.S., 2019. Chemical Characterization, Antioxidant, Cytotoxic and Microbiological Activities of the Essential Oil of Leaf of *Tithonia Diversifolia* (Hemsl) A. Gray (Asteraceae). *Pharmaceuticals* 12, 34. <https://doi.org/10.3390/ph12010034>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017. Citrus fruit, fresh and processed statistical bulletin 2016. Trade Mark. Div. 47.
- Gade, R., Lad, R., 2019. Strategies for management of Phytophthora diseases in citrus in India. pp. 435–451.
- Gallegly, M.E., ChuanXue, H., 2008. Phytophthora: identifying species by morphology and DNA fingerprints. *Phytophthora Identifying Species Morphol. DNA Fingerpr.*
- Garbach, K., Milder, J.C., Montenegro, M., Karp, D.S., DeClerck, F.A.J., 2014. Biodiversity and Ecosystem Services in Agroecosystems, in: *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Elsevier, pp. 21–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00013-9>
- García-Latorre, C., Rodrigo, S., Santamaria, O., 2022. Protective Effects of Filtrates and Extracts from Fungal Endophytes on *Phytophthora cinnamomi* in *Lupinus luteus*. *Plants* 11, 1455. <https://doi.org/10.3390/plants11111455>
- Giannousi, K., Avramidis, I., Dendrinou-Samara, C., 2013. Synthesis, characterization and evaluation of copper based nanoparticles as agrochemicals against *Phytophthora infestans*. *RSC Adv.* 3, 21743–21752. <https://doi.org/10.1039/C3RA42118J>
- Giblin, F., Pegg, K., Willingham, S., Anderson, J., Coates, L., Cooke, T., Dean, J., Smith, L., 2005. *Phytophthora* revisited, in: *New Zealand and Australia Avocado Grower's Conference*.
- Gidoïn, C., 2013a. Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer : la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun. 212.
- Gidoïn, C., 2013b. Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer : la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun. 212.
- Gidoïn, C., Babin, R., Beilhe, L.B., Cilas, C., Hoopen, G.M.T., Bieng, M.A.N., 2014. Tree spatial structure, host composition and resource availability influence mirid density or black pod prevalence in cacao agroforests in cameroon. *PLoS ONE* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109405>
- Global economics and marketing of citrus products, 2020. . *Genus Citrus* 471–493. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00023-1>
- González, M., Romero, M.-Á., García, L.-V., Gómez-Aparicio, L., Serrano, M.-S., 2020. Unravelling the role of drought as predisposing factor for *Quercus suber* decline caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Eur. J. Plant Pathol.* 156, 1015–1021.
- González-Stuart, A.E., Rivera, J.O., 2019. Nutritional and Therapeutic Applications of Prickly Pear Cacti, in: *Bioactive Food as Dietary Interventions for Diabetes*. Elsevier, pp. 349–360. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813822-9.00023-0>
- Goreaud, F., Pelissier, R., 2000. Analyse de la structure spatiale de semis de points hétérogènes : exemples d'application à des peuplements forestiers (report). *irstea*.
- Graham, J., Feichtenberger, E., 2015a. Citrus phytophthora diseases: Management challenges and successes. *J. Citrus Pathol.* 2. <https://doi.org/10.5070/C421027203>
- Graham, J., Feichtenberger, E., 2015b. Citrus phytophthora diseases: Management challenges and successes. *J. Citrus Pathol.* 2.
- Graham, J.H., Johnson, E.G., Gottwald, T.R., Irely, M.S., 2013. Presymptomatic fibrous root decline in citrus trees caused by huanglongbing and potential interaction with *Phytophthora* spp. *Plant Dis.* 97, 1195–1199. <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-13-0024-RE>
- Graham, J.H., Menge, J.A., 2000. *Phytophthora*-induced diseases. *Compend. Citrus Dis.* 12–15.
- Graham, J.H., Menge, J.A., 1999. Root diseases. *Citrus Health Manag.* 126–135.

- Graham, J.H., Timmer, L.W., 2006. Phytophthora diseases of citrus. University of Florida, IFAS extension. Available at: <http://Edis.Ifas.Ufl.Edu/CH087>.
- Graham, J.H., Timmer, L.W., 1994. Phytophthora Diseases of Citrus. Univ. Fla. IFAS Ext. 1–11.
- Granke, L.L., Hausbeck, M.K., 2010. Effects of Temperature, Humidity, and Wounding on Development of Phytophthora Rot of Cucumber Fruit. *Plant Dis.* 94, 1417–1424. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-10-0258>
- Granke, L.L., Quesada-Ocampo, L., Lamour, K., Hausbeck, M.K., 2012. Advances in Research on Phytophthora capsici on Vegetable Crops in The United States. *Plant Dis.* 96, 1588–1600. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-12-0211-FE>
- Gray, M.A., Hao, W., Förster, H., Adaskaveg, J.E., 2018. Baseline sensitivities of new fungicides and their toxicity to selected life stages of Phytophthora species from citrus in California. *Plant Dis.* 102, 734–742. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-17-1155-RE>
- Green, K.K., Stenberg, J.A., Lankinen, Å., 2020. Making sense of Integrated Pest Management (IPM) in the light of evolution. *Evol. Appl.* 13, 1791–1805. <https://doi.org/10.1111/eva.13067>
- Green, S., Green, S., Marzano, M., Frederickson-matika, D., Valatin, G., Pérez-sierra, A., Clark, M., Henricot, B., Hutton, J., Randall, E., Clark, B., Cock, P., Thorpe, P., 2019. Thapbi final report form 1. 1–28.
- Gundo, S., Parauha, Y.R., Singh, N., Dhoble, S.J., 2021. Eco-friendly synthesis route of silver nanoparticle: A review. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1913, 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1913/1/012052>
- Guo, L., Liu, L., Wang, J., Jin, H., Fang, Y., 2020. Long term cyclic behavior of saturated soft clay under different drainage conditions. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 139, 106362. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106362>
- Gyau, A., Smoot, K., Diby, L., Kouame, C., 2015. Drivers of tree presence and densities: the case of cocoa agroforestry systems in the Soubre region of Republic of Côte d'Ivoire. *Agrofor. Syst.* 89, 149–161. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9750-1>
- Gyeltshen, J., Dunstan, W.A., Grigg, A.H., Burgess, T.I., St. J. Hardy, G.E., 2021. The influence of time, soil moisture and exogenous factors on the survival potential of oospores and chlamydospores of Phytophthora cinnamomi. *For. Pathol.* 51, e12637. <https://doi.org/10.1111/efp.12637>
- H Ho, H., 2018. The Taxonomy and Biology of Phytophthora and Pythium. *J. Bacteriol. Mycol. Open Access* 6. <https://doi.org/10.15406/jbmoa.2018.06.00174>
- Hansen, E.M., 2015. Phytophthora species emerging as pathogens of forest trees. *Curr. For. Rep.* 1, 16–24. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0007-7>
- Hansen, E.M., Reeser, P.W., Sutton, W., 2012. Phytophthora Beyond Agriculture. *Annu. Rev. Phytopathol.* 50, 359–378. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081211-172946>
- Hao, W., Gray, M.A., Förster, H., Adaskaveg, J.E., 2019. Evaluation of new oomycota fungicides for management of phytophthora root rot of citrus in California. *Plant Dis.* 103, 619–628. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-18-1152-RE>
- Hassaan, M.A., El Nemr, A., 2020. Pesticides pollution: Classifications, human health impact, extraction and treatment techniques. *Egypt. J. Aquat. Res.* 46, 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.08.007>
- Health (PLH), E.P. on P., Jeger, M., Bragard, C., Caffier, D., Candresse, T., Chatzivassiliou, E., Dehnen-Schmutz, K., Gilioli, G., Gregoire, J.-C., Jaques Miret, J.A., MacLeod, A., Navajas Navarro, M., Niere, B., Parnell, S., Potting, R., Rafoss, T., Rossi, V., Urek, G., Van Bruggen, A., Van der Werf, W., West, J., Winter, S., Boberg, J., Gonthier, P., Pautasso, M., 2017. Pest categorisation of Pseudocercospora pini-densiflorae. *EFSA J.* 15, e05029. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.5029>
- Home | IDphy [WWW Document], n.d. URL <https://idtools.org/id/phytophthora/> (accessed 7.20.21).

- Homet, P., González, M., Matías, L., Godoy, O., Pérez-Ramos, I.M., García, L.V., Gómez-Aparicio, L., 2019. Exploring interactive effects of climate change and exotic pathogens on *Quercus suber* performance: Damage caused by *Phytophthora cinnamomi* varies across contrasting scenarios of soil moisture. *Agric. For. Meteorol.* 276–277, 107605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.06.004>
- Hussain, S.Z., Naseer, B., Qadri, T., Fatima, T., Bhat, T.A., 2021. Citrus Fruits—Morphology, Taxonomy, Composition and Health Benefits, in: Hussain, S.Z., Naseer, B., Qadri, T., Fatima, T., Bhat, T.A. (Eds.), *Fruits Grown in Highland Regions of the Himalayas: Nutritional and Health Benefits*. Springer International Publishing, Cham, pp. 229–244. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75502-7_18
- Ibrahim, H.M.M., 2019. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using banana peel extract and their antimicrobial activity against representative microorganisms. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.01.007>
- Jagoret, P., Kwesseu, J., Messie, C., Michel-Dounias, I., Malézieux, E., 2014a. Farmers' assessment of the use value of agrobiodiversity in complex cocoa agroforestry systems in central Cameroon. *Agrofor. Syst.* 88, 983–1000.
- Jagoret, P., Kwesseu, J., Messie, C.A., Michel, I., Malézieux, É., 2014b. Valeurs d'usage des ligneux utilisés en agroforesterie : les cacaoyères du Centre-Cameroun. *BOIS FORETS Trop.* 321, 45. <https://doi.org/10.19182/bft2014.321.a31217>
- Jagoret, P., Michel-Dounias, I., Snoeck, D., Ngnogué, H.T., Malézieux, E., 2012. Afforestation of savannah with cocoa agroforestry systems: a small-farmer innovation in central Cameroon. *Agrofor. Syst.* 86, 493–504.
- Jaouad, M., Moinina, A., Ezrari, S., Lahlali, R., 2020. Key pests and diseases of citrus trees with emphasis on root rot diseases: An overview. *Moroc. J. Agric. Sci.* 1.
- Jiofack, J., 2013. Agroforestry typology of some cocoa based agroforests in the Mbam and Inoubou division: The importance for local population livelihoods. *J. Ecol. Nat. Environ.* 5, 378–386. <https://doi.org/10.5897/JENE12.085>
- Jonsson, M., Raphael, I.A., Ekbom, B., Kyamanywa, S., Karungi, J., 2015. Contrasting effects of shade level and altitude on two important coffee pests. *J. Pest Sci.* 88, 281–287. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0615-1>
- Jung, T., La Spada, F., Pane, A., Aloï, F., Evoli, M., Horta Jung, M., Scanu, B., Faedda, R., Rizza, C., Puglisi, I., Magnano di San Lio, G., Schena, L., Cacciola, S.O., 2019. Diversity and Distribution of *Phytophthora* Species in Protected Natural Areas in Sicily. *Forests* 10, 259. <https://doi.org/10.3390/f10030259>
- Juroszek, P., von Tiedemann, A., 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathol.* 60, 100–112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02410.x>
- Kachhawa, D.D., n.d. Trap crop: A pest management technique 3.
- Kamoun, S., Furzer, O., Jones, J.D.G., Judelson, H.S., Ali, G.S., Dalio, R.J.D., Roy, S.G., Schena, L., Zambounis, A., Panabières, F., Cahill, D., Ruocco, M., Figueiredo, A., Chen, X.R., Hulvey, J., Stam, R., Lamour, K., Gijzen, M., Tyler, B.M., Grünwald, N.J., Mukhtar, M.S., Tomé, D.F.A., Tör, M., Van Den Ackerveken, G., McDowell, J., Daayf, F., Fry, W.E., Lindqvist-Kreuzer, H., Meijer, H.J.G., Petre, B., Ristaino, J., Yoshida, K., Birch, P.R.J., Govers, F., 2015. The Top 10 oomycete pathogens in molecular plant pathology. *Mol. Plant Pathol.* 16, 413–434. <https://doi.org/10.1111/mpp.12190>
- Kan, Z., Kwan, M., Tang, L., 2021. Ripley's K-function for Network-Constrained Flow Data. *Geogr. Anal. gean.12300.* <https://doi.org/10.1111/gean.12300>
- Kaur, Y., Arora, A., Thind, S.K., 2022. Spatial distribution of *Phytophthora nicotianae* in citrus rhizosphere. *Indian Phytopathol.* 75, 969–977. <https://doi.org/10.1007/s42360-022-00553-1>
- Kaur, Y., Thind, S.K., Arora, A., 2021. Survival of *Phytophthora nicotianae* in citrus rhizosphere. *J. Plant Pathol.* 103, 1307–1313. <https://doi.org/10.1007/s42161-021-00878-2>

- Kebdani, N., Pieuchot, L., Deleury, E., Panabières, F., Le Berre, J.-Y., Gourgues, M., 2010. Cellular and molecular characterization of *Phytophthora parasitica* appressorium-mediated penetration. *New Phytol.* 185, 248–257. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03048.x>
- Keesing, F., Belden, L.K., Daszak, P., Dobson, A., Harvell, C.D., Holt, R.D., Hudson, P., Jolles, A., Jones, K.E., Mitchell, C.E., Myers, S.S., Bogich, T., Ostfeld, R.S., 2010. Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature* 468, 647–652. <https://doi.org/10.1038/nature09575>
- Keesing, F., Holt, R.D., Ostfeld, R.S., 2006. Effects of species diversity on disease risk. *Ecol. Lett.* 9, 485–498. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00885.x>
- Khanchouch, K., Pane, A., Chriki, A., Cacciola, S.O., 2017. Major and Emerging Fungal Diseases of Citrus in the Mediterranean Region. *Citrus Pathol.* <https://doi.org/10.5772/66943>
- Khanramaki, M., Askari Asli-Ardeh, E., Kozegar, E., 2021. Citrus pests classification using an ensemble of deep learning models. *Comput. Electron. Agric.* 186, 106192. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106192>
- Kroon, L.P.N.M., Brouwer, H., De Cock, A.W.A.M., Govers, F., 2012. The genus *Phytophthora* anno 2012. *Phytopathology* 102, 348–364. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-11-0025>
- Kuate, J., Bella-Manga, Damesse, F., Kouodiekong, L., Ndindeng, S.A., David, O., Parrot, L., 2006. Enquête sur les cultures fruitières dans les exploitations familiales agricoles en zone humide du Cameroun. *Fruits* 61, 373–387. <https://doi.org/10.1051/fruits:2006037>
- Kumar, S., Taneja, S., Banyal, S., Singhal, M., Kumar, V., Sahare, S., Lee, S.-L., Choubey, R.K., 2021. Bio-synthesised Silver Nanoparticle-Conjugated L-Cysteine Ceiled Mn:ZnS Quantum Dots for Eco-friendly Biosensor and Antimicrobial Applications. *J. Electron. Mater.* 50, 3986–3995. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08926-4>
- Kumi, A.E., Amoako-Attah, I., Bukari, Y., 2020. *Phytophthora* seedling blight disease of cacao and its control measures. *Afr. J. Agric. Res.* 16, 632–639. <https://doi.org/10.5897/AJAR2019.14662>
- Lad, R.S., Gade, R.M., Peddinti, S.R., Adinarayana, J., 2021. Seasonal impact on population dynamics of *Phytophthora* spp. and disease progression in Mandarin. *Indian Phytopathol.* <https://doi.org/10.1007/s42360-021-00332-4>
- Lakshmi, V., Jackson, T.J., Zehrhuhs, D., 2003. Soil moisture–temperature relationships: results from two field experiments. *Hydrol. Process.* 17, 3041–3057. <https://doi.org/10.1002/hyp.1275>
- Latijnhouwers, M., de Wit, P.J.G.M., Govers, F., 2003. Oomycetes and fungi: similar weaponry to attack plants. *Trends Microbiol.* 11, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2003.08.002>
- Leakey, R.R.B., 2017. Definition of Agroforestry Revisited. *Multifunct. Agric.* 5–6. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805356-0.00001-5>
- Ledo, A., Schnitzer, S.A., 2014. Disturbance and clonal reproduction determine liana distribution and maintain liana diversity in a tropical forest. *Ecology* 95, 2169–2178. <https://doi.org/10.1890/13-1775.1>
- Li, J., Luan, Y., Liu, Z., 2015. Overexpression of *SpWRKY1* promotes resistance to *Phytophthora nicotianae* and tolerance to salt and drought stress in transgenic tobacco. *Physiol. Plant.* 155, 248–266. <https://doi.org/10.1111/ppl.12315>
- Liu, F., Li, B., Lian, S., Dong, X., Wang, C., Zhang, Z., Liang, W., 2018. Effects of Temperature and Moisture on the Infection and Development of Apple Fruit Rot Caused by *Phytophthora cactorum*. *Plant Dis.* 102, 1811–1819. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-17-1028-RE>
- Liu, H., Yu, H., Zhang, Z., Bi, X., Yang, Z., Chen, Y., Gu, X., Wen, J., 2022. The adaptability of *Phytophthora sojae* to different types of soil determines the distribution of *Phytophthora* root rot of soybean in Heilongjiang Province of China. *Eur. J. Plant Pathol.* 162, 93–104. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02387-5>

- Liu, Yuqiu, Heying, E., Tanumihardjo, S.A., 2012. History, Global Distribution, and Nutritional Importance of Citrus Fruits. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 11, 530–545. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00201.x>
- Liu, Y., Tao, Y., Wan, K.Y., Zhang, G.S., Liu, D.B., Xiong, G.Y., Chen, F., 2012. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China. *Agric. Water Manag.* 110, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.011>
- Ma, H., Li, X., Yan, T., Li, Y., Zhang, Y., Wu, D., Wei, Q., Du, B., 2016. Electrochemiluminescent immunosensing of prostate-specific antigen based on silver nanoparticles-doped Pb (II) metal-organic framework. *Biosens. Bioelectron.* 79, 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.12.080>
- Mabou Tagne, A., Marino, F., Cosentino, M., 2018. *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray as a medicinal plant: A comprehensive review of its ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacotoxicology and clinical relevance. *J. Ethnopharmacol.* 220, 94–116. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.03.025>
- Mahmood, I., Imadi, S.R., Shazadi, K., Gul, A., Hakeem, K.R., 2016. Effects of Pesticides on Environment, in: Hakeem, K.R., Akhtar, M.S., Abdullah, S.N.A. (Eds.), *Plant, Soil and Microbes: Volume 1: Implications in Crop Science*. Springer International Publishing, Cham, pp. 253–269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3_13
- Malézieux, E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 15–29. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z>
- Martin, E.A., Feit, B., Requier, F., Friberg, H., Jonsson, M., 2019. Chapter Three - Assessing the resilience of biodiversity-driven functions in agroecosystems under environmental change, in: Bohan, D.A., Dumbrell, A.J. (Eds.), *Advances in Ecological Research, Resilience in Complex Socio-Ecological Systems*. Academic Press, pp. 59–123. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2019.02.003>
- Masurkar, S.A., Chaudhari, P.R., Shidore, V.B., Kamble, S.P., 2011. Rapid Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using *Cymbopogon Citratus* (Lemongrass) and its Antimicrobial Activity. *Nano-Micro Lett.* 3, 189–194. <https://doi.org/10.1007/BF03353671>
- Matheron, M.E., Wright, G.C., Porchas, M., 1998. Resistance to *Phytophthora citrophthora* and *P. parasitica* and nursery characteristics of several citrus rootstocks. *Plant Dis.* 82, 1217–1225. <https://doi.org/10.1094/PDIS.1998.82.11.1217>
- Mazzola, M., Granatstein, D.M., Elfving, D.C., Mullinix, K., 2001. Suppression of Specific Apple Root Pathogens by Brassica napus Seed Meal Amendment Regardless of Glucosinolate Content. *Phytopathology*® 91, 673–679. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2001.91.7.673>
- Mbarga, J.B., Begoude, B.A.D., Ambang, Z., Meboma, M., Kuate, J., Ewbank, W., Hoopen, G.M. ten, 2020. Field testing an oil-based *Trichoderma asperellum* formulation for the biological control of cacao black pod disease, caused by *Phytophthora megakarya*. *Crop Prot.* 132, 105134. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105134>
- Mbarga, J.B., Begoude, B.A.D., Ambang, Z., Meboma, M., Kuate, J., Schiffers, B., Ewbank, W., Dedieu, L., Hoopen, G.M. ten, 2014. A new oil-based formulation of *Trichoderma asperellum* for the biological control of cacao black pod disease caused by *Phytophthora megakarya*. *Biol. Control* 77, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.06.004>
- Mbolo, M.M.A., Zekeng, J.C., Mala, W.A., Fobane, J.L., Chimi, C.D., Ngavounsia, T., Nyako, C.M., Menyene, L.F.E., Tamanjong, Y.V., 2016. The role of cocoa agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central region of Cameroon. *Agrofor. Syst.* 90, 577–590.
- Meena, R.L., Mathur, A.C., Shivpuri, A., 2011. Environmental factors affecting disease development and viability of smut of pearl millet pathogen in soil. *Indian Phytopathol.* 64, 363–366.

- Meitz-Hopkins, J.C., Pretorius, M.C., Spies, C.F.J., Huisman, L., Botha, W.J., Langenhoven, S.D., McLeod, A., 2014. *Phytophthora* species distribution in South African citrus production regions. *Eur. J. Plant Pathol.* 138, 733–749. <https://doi.org/10.1007/s10658-013-0346-9>
- Meng, Y., Zhang, Q., Ding, W., Shan, W., 2014. *Phytophthora parasitica*: a model oomycete plant pathogen. *Mycology* 5, 43–51. <https://doi.org/10.1080/21501203.2014.917734>
- Meno, L., Abuley, I.K., Escuredo, O., Seijo, M.C., 2023. Factors influencing the airborne sporangia concentration of *Phytophthora infestans* and its relationship with potato disease severity. *Sci. Hortic.* 307, 111520. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111520>
- Meno, Laura, Escuredo, O., Abuley, I.K., Seijo, M.C., 2023. Predicting Daily Aerobiological Risk Level of Potato Late Blight Using C5.0 and Random Forest Algorithms under Field Conditions. *Sensors* 23, 3818. <https://doi.org/10.3390/s23083818>
- Motisi, N., Papaïx, J., Poggi, S., 2022. The Dark Side of Shade: How Microclimates Drive the Epidemiological Mechanisms of Coffee Berry Disease. *Phytopathology* 112, 1235–1243. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-21-0247-R>
- Mounde, L., 2012. Morphological characterization and identification of *Phytophthora* species causing citrus gummosis in Kenya. *Afr. J. Food Agric. Nutr. Dev.* 12.
- Mounde, L.G., Kihurani, A.W., Ateka, E.M., Wasilwa, L., Thurania, E.G., 2008. Occurrence and distribution of citrus gummosis (*Phytophthora* spp.) in Kenya.
- Mousumi Das, M., Haridas, M., Sabu, A., 2019. Biological control of black pepper and ginger pathogens, *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani* and *Phytophthora capsici*, using *Trichoderma* spp. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 17, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.021>
- Mvondo, E.A., Danièle Ndo, E.G., Nomo, L.B., Ambang, Z., Manga, F.B., Cilas, C., 2022. Tree diversity and shade rate in complex cocoa-based agroforests affect citrus foot rot disease. *Basic Appl. Ecol.* <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.08.003>
- Nawaz, K., Shahid, A.A., Bengyella, L., Subhani, M.N., Ali, M., Anwar, W., Iftikhar, S., Ali, S.W., 2018. Diversity of *Trichoderma* species in chili rhizosphere that promote vigor and antagonism against virulent *Phytophthora capsici*. *Sci. Hortic.* 239, 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.048>
- Ndo, E., Akoutou, E., Manga, B., N.L. B., 2022. Predicting Model for Epidemiological Risk Management of Citrus *Pseudocercospora* Leaves and Fruits Spot Disease in Cameroon. *J. Hortic.* Vol.8, 11P.
- Ndo, E., Bella-Manga, F., Ndindeng, S.A., Ndoumbe-Nkeng, M., Fontem, D., Cilas, C., 2010. Altitude, tree species and soil type are the main factors influencing the severity of *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus in the humid zones of Cameroon. *Eur. J. Plant Pathol.* 128, 385–397. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9660-7>
- Ndo, E., Manga, B., Ndoumbe-Nkeng, M., Cilas, C., 2019. Distribution of *Pseudocercospora* fruit and leaf spot, *Phytophthora* foot rot and scab diseases and their effect on Citrus tree decline prevalence in the humid zones of Cameroon. *Fruits* 74, 249–256. <https://doi.org/10.17660/th2019/74.5.5>
- Ndo, E.G.D., 2011. Evaluation des facteurs de risque épidémiologique de la *Phaeoramulariose* des agrumes dans les zones humides du Cameroun (thesis). UM2.
- Ndo, E. G. D., Akoutou Mvondo, E., Bella Manga, F., Bidzanga Nomo, L., Cilas, C., 2023. Spatial Distribution of Citrus *Pseudocercospora* Leaf and Fruit Spot Disease and Shade Effect on Disease Intensity. *Crops* 3, 11–23. <https://doi.org/10.3390/crops3010002>
- Ndo, Eunice Golda Danièle, Akoutou Mvondo, E., Bidzanga Nomo, L., Bella Manga, F., Ambang, Z., Cilas, C., 2023. Farmer's strategies in the choice of citrus spatial structures in cocoa-based agroforests in Cameroon. *Agrofor. Syst.* <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00817-3>
- Ndo, E.G.D., Kuate, J., Sidjeu Wonfa, C.S., Tchio, F., Ndzana Abanda, F.X., Mbieji Kemayou, C., Akoutou Mvondo, E., Amele Ndjoumoui, C., Amang A Mbang, J., 2019. Tolerance of

- citrus genotypes towards *Pseudocercospora* leaf and fruit spot disease in western highlands zone of Cameroon. *Crop Prot.* 124, 104828. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.022>
- Ndo, Eunice Golda Danièle, Mvondo, E.A., Ambang, Z., Manga, B., Cilas, C., Nomo, L.B., Gidoïn, C., Bieng, M.-A.N., 2019. Spatial organisation influences citrus *Pseudocercospora* leaf and fruit spot disease severity in cocoa-based agroforestry systems [WWW Document]. undefined. URL /paper/Spatial-organisation-influences-citrus-leaf-and-in-Ndo-Mvondo/5f9aab68d387c331b3af966ab0b93810b7b9e672 (accessed 10.21.20).
- Ndougue, M., Petchayo, S., Techou, Z., Nana, W.G., Nembot, C., Fontem, D., Hoopen, G.M.T., 2018. The impact of soil treatments on black pod rot (caused by *Phytophthora megakarya*) of cacao in Cameroon. *Biol. Control* 123, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.04.016>
- Negash, M., Starr, M., 2021. Litter decomposition of six tree species on indigenous agroforestry farms in south-eastern Ethiopia in relation to litterfall carbon inputs and modelled soil respiration. *Agrofor. Syst.* 95, 755–766. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00630-w>
- Nesbitt, H.J., Malajczuk, N., Glenn, A.R., 1979. Effect of organic matter on the survival of *Phytophthora cinnamomi* Rands in soil. *Soil Biol. Biochem.* 11, 133–136.
- Nesper, M., Kueffer, C., Krishnan, S., Kushalappa, C.G., Ghazoul, J., 2017. Shade tree diversity enhances coffee production and quality in agroforestry systems in the Western Ghats. *Agric. Ecosyst. Environ.* 247, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.024>
- Newhook, F.J., Waterhouse, G.M., Stamps, D.J., 1978. Tabular key to the species of *Phytophthora* de Bary. *Mycol. Pap.*
- Ngo Bieng, M.A., Alem, L., Curtet, C., Tixier, P., 2017. Tree spacing impacts the individual incidence of *Moniliophthora roreri* disease in cacao agroforests. *Pest Manag. Sci.* 73, 2386–2392. <https://doi.org/10.1002/ps.4635>
- Ngo Bieng, M.A., Gidoïn, C., Avelino, J., Cilas, C., Deheuvels, O., Wery, J., 2013. Diversity and spatial clustering of shade trees affect cacao yield and pathogen pressure in Costa Rican agroforests. *Basic Appl. Ecol.* 14, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.baee.2013.03.003>
- Nijmeijer, A., Lauri, P.-É., Harmand, J.-M., Saj, S., 2019. Carbon dynamics in cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: afforestation of savannah as a sequestration opportunity. *Agrofor. Syst.* 93, 851–868.
- Nkurunziza, L., Watson, C.A., Öborn, I., Smith, H.G., Bergkvist, G., Bengtsson, J., 2020. Socio-ecological factors determine crop performance in agricultural systems. *Sci. Rep.* 10, 4232. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60927-1>
- Noorizadeh, S., Golmohammadi, M., Bagheri, A., Bertaccini, A., 2022. Citrus industry: Phytoplasma-associated diseases and related challenges for Asia, America and Africa. *Crop Prot.* 151, 105822. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105822>
- Nyasse, S., Efombagn, M.I.B., 2017. Preliminary observations on *Phytophthora* sp. on kola (*Cola nitida*) (Vent.) Schott and Endlicher: implications in epidemiology of the black pod disease of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in Cameroon. *Int. J. Agric. Biosci.* 6, 49–52.
- O’Gara, E., McComb, J.A., Colquhoun, I.J., Hardy, G.E.St.J., 1997. The infection of non-wounded and wounded periderm tissue at the lower stem of *Eucalyptus marginata* by zoospores of *Phytophthora cinnamomi*, in a rehabilitated bauxite mine. *Australas. Plant Pathol.* 26, 135. <https://doi.org/10.1071/AP97023>
- Ojo, O.A., Ojo, A.B., Ajiboye, B.O., Olaiya, O., Okesola, M.A., Boligon, A.A., de Campos, M.M.A., Oyinloye, B.E., Kappo, A.P., 2018. HPLC-DAD fingerprinting analysis, antioxidant activities of *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray leaves and its inhibition of key enzymes linked to Alzheimer’s disease. *Toxicol. Rep.* 5, 585–592. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.05.003>
- Oke, A.O., Oladigbolu, A.A., Kunta, M., Alabi, O.J., Sétamou, M., 2020. First report of the occurrence of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae), an invasive species in Nigeria, West Africa. *Sci. Rep.* 10, 9418. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66380-4>

- Ollitrault, P., Curk, F., Krueger, R., 2020. Citrus taxonomy, in: *The Genus Citrus*. Elsevier, pp. 57–81. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00004-8>
- Ollitrault, P., Navarro, L., 2012a. Citrus, in: Badenes, M.L., Byrne, D.H. (Eds.), *Fruit Breeding*. Springer US, Boston, MA, pp. 623–662. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0763-9_16
- Ollitrault, P., Navarro, L., 2012b. Citrus, in: Badenes, M.L., Byrne, D.H. (Eds.), *Fruit Breeding, Handbook of Plant Breeding*. Springer US, Boston, MA, pp. 623–662. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0763-9_16
- Ostrofsky, W.D., Pratt, R.G., Roth, L.F., 1977. Detection of *Phytophthora lateralis* in soil organic matter and factors that affect its survival. *Phytopathology* 67, 79–84.
- Pakora, G.-A., Mpika, J., Kone, D., Ducamp, M., Kebe, I., Nay, B., Buisson, D., 2018. Inhibition of *Phytophthora* species, agents of cocoa black pod disease, by secondary metabolites of *Trichoderma* species. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 29901–29909. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0283-9>
- Panabières, F., Gul, S., Ali, G., Allagui, M., Dalio, J., Gudmestad, N., Kuhn, M.L., Guha Roy, S., Schena, L., Zambounis, A., 2016. *Phytophthora nicotianae* diseases worldwide: New knowledge of a long-recognised pathogen. *Phytopathol. Mediterr.* 55, 20–40. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-16423
- Panth, M., Hassler, S.C., Baysal-Gurel, F., 2020. Methods for Management of Soilborne Diseases in Crop Production. *Agriculture* 10, 16. <https://doi.org/10.3390/agriculture10010016>
- Patel, R.A., Patel, B.K., 2020. Comparative study of chemical fungicides for the management of citrus gummosis *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* in north Gujarat condition. *Int. J. Hortic. Agric. Food Sci.* 4, 186–188. <https://doi.org/10.22161/ijhaf.4.5.1>
- Perrin, A., San Cristobal, M., Milestad, R., Martin, G., 2020. Identification of resilience factors of organic dairy cattle farms. *Agric. Syst.* 183, 102875.
- Perrine-Walker, F., 2020. *Phytophthora palmivora*–Cocoa Interaction. *J. Fungi* 6, 167. <https://doi.org/10.3390/jof6030167>
- Pietikäinen, J., Pettersson, M., Bååth, E., 2005. Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates. *FEMS Microbiol. Ecol.* 52, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.10.002>
- Pinu, F.R., Beale, D.J., Paten, A.M., Kouremenos, K., Swarup, S., Schirra, H.J., Wishart, D., 2019. Systems Biology and Multi-Omics Integration: Viewpoints from the Metabolomics Research Community. *Metabolites* 9, 76. <https://doi.org/10.3390/metabo9040076>
- Plaats-Niterink, A.J.V. der, 1981. Monograph of the genus *Pythium*. *Stud. Mycol.*
- Plath, M., Dorn, S., Riedel, J., Barrios, H., Mody, K., 2012. Associational resistance and associational susceptibility: specialist herbivores show contrasting responses to tree stand diversification. *Oecologia* 169, 477–487. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2215-6>
- Prasad, T., Elumalai, E., 2011. Biofabrication of Ag nanoparticles using *Moringa oleifera* leaf extract and their antimicrobial activity. *Asian Pac. J. Trop. Biomed.* 1, 439–442. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(11\)60096-8](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(11)60096-8)
- Puig, A.S., Ali, S., Strem, M., Sicher, R., Gutierrez, O.A., Bailey, B.A., 2018. The differential influence of temperature on *Phytophthora megakarya* and *Phytophthora palmivora* pod lesion expansion, mycelia growth, gene expression, and metabolite profiles. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 102, 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.12.002>
- Pumariño, L., Sileshi, G.W., Gripenberg, S., Kaartinen, R., Barrios, E., Muchane, M.N., Midega, C., Jonsson, M., 2015. Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic Appl. Ecol.* 16, 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2015.08.006>
- Raghavan, S., Gurunathan, J., 2021. Citrus species – a golden treasure box of metabolites that is beneficial against disorders. *J. Herb. Med.* 28, 100438. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2021.100438>
- Rai, G.S., Guest, D.I., 2021. Drainage, animal manures and fungicides reduce *Phytophthora* wilt (caused by *Phytophthora capsici*) of chilli (*Capsicum annum* L.) in Bhutan. *Australas. Plant Pathol.* 50, 169–177. <https://doi.org/10.1007/s13313-020-00755-z>

- Rajput, N., Atiq, M., Tariq, H., Modassar, W., Hameed, A., 2020. Citrus Gummosis: A Formidable Challenge to Citrus Industry: A Review 16, 131–144. <https://doi.org/10.12692/ijb/16.5.131-144>
- Rao, M.V., Rice, R.A., Fleischer, R.C., Muletz-Wolz, C.R., 2020. Soil fungal communities differ between shaded and sun-intensive coffee plantations in El Salvador. PLOS ONE 15, e0231875. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231875>
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., Habib, R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. Agron. Sustain. Dev. 32, 273–303. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>
- Ristaino, J.B., 2012. A lucid key to the common species of *Phytophthora*. Plant Dis. 96, 897–903. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-11-0636>
- Ristaino, J.B., Gumpertz, M.L., 2000. New Frontiers in the Study of Dispersal and Spatial Analysis of Epidemics Caused by Species in the Genus *Phytophthora*. Annu. Rev. Phytopathol. 38, 541–576. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.38.1.541>
- Rodrigues da Silva, A., da Costa Silva, D., dos Santos Pinto, K.N., Santos Filho, H.P., Coelho Filho, M.A., dos Santos Soares Filho, W., Ferreira, C.F., da Silva Gesteira, A., 2021. Epigenetic responses to *Phytophthora citrophthora* gummosis in citrus. Plant Sci. 313, 111082. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111082>
- Rodriguez-Padron, C., Siverio, F., Perez-Sierra, A., Rodriguez, A., 2018. Isolation and pathogenicity of *Phytophthora* species and *Phytophthora vexans* recovered from avocado orchards in the Canary Islands, including *Phytophthora niederhauserii* as a new pathogen of avocado. Phytopathol. Mediterr. 57, 89–106.
- Rohart, F., Gautier, B., Singh, A., Cao, K.-A.L., 2017. mixOmics: An R package for ‘omics feature selection and multiple data integration. PLOS Comput. Biol. 13, e1005752. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005752>
- Ruf, F., Schroth, G. (Eds.), 2015. Economics and Ecology of Diversification. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7294-5>
- Rupiasih, N.N., Aher, A., Gosavi, S., Vidyasagar, P.B., 2015. Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Latex Extract of *Thevetia Peruviana*: A Novel Approach Towards Poisonous Plant Utilization, in: Gaol, F.L., Shrivastava, K., Akhtar, J. (Eds.), Recent Trends in Physics of Material Science and Technology, Springer Series in Materials Science. Springer, Singapore, pp. 1–10. https://doi.org/10.1007/978-981-287-128-2_1
- Saha, A., Zaman, S., Mitra, A., 2017. Assessment of Coastal Water Quality using Aquatic Health Index (AHI). Parana J. Sci. Educ. 34–41.
- Saj, S., Jagoret, P., Etoa, L.E., Eteckji Fonkeng, E., Tarla, J.N., Essobo Nieboukaho, J.-D., Mvondo Sakouma, K., 2017. Lessons learned from the long-term analysis of cacao yield and stand structure in central Cameroonian agroforestry systems. Agric. Syst. 156, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.002>
- Salgadoe, A.S.A., Robson, A.J., Lamb, D.W., Dann, E.K., 2019. Assessment of Canopy Porosity in Avocado Trees as a Surrogate for Restricted Transpiration Emanating from *Phytophthora* Root Rot. Remote Sens. 11, 2972. <https://doi.org/10.3390/rs11242972>
- Sanchez, A.D., Ousset, M.J., Sosa, M.C., 2019. Biological control of *Phytophthora* collar rot of pear using regional *Trichoderma* strains with multiple mechanisms. Biol. Control 135, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.05.012>
- Sandani, H.B.P., Ranathunge, N.P., Lakshman, P.L.N., Weerakoon, W.M.W., 2019. Biocontrol potential of five *Burkholderia* and *Pseudomonas* strains against *Colletotrichum truncatum* infecting chilli pepper. Biocontrol Sci. Technol. 29, 727–745. <https://doi.org/10.1080/09583157.2019.1597331>
- Santonja, M., Rancon, A., Fromin, N., Baldy, V., Hättenschwiler, S., Fernandez, C., Montès, N., Mirleau, P., 2017. Plant litter diversity increases microbial abundance, fungal diversity, and carbon and nitrogen cycling in a Mediterranean shrubland. Soil Biol. Biochem. 111, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.006>

- Sawake, M.M., Moharil, M.P., Ingle, Y.V., Jadhav, P.V., Ingle, A.P., Khelurkar, V.C., Paithankar, D.H., Bathe, G.A., Gade, A.K., 2022. Management of *Phytophthora parasitica* causing gummosis in citrus using biogenic copper oxide nanoparticles. *J. Appl. Microbiol.* 132, 3142–3154. <https://doi.org/10.1111/jam.15472>
- Scagel, D.C.F., Weiland, D.J.E., Beck, M.B.R., Mitchell, M.J., 2023. Temperature and fungicide sensitivity in three prevalent *Phytophthora* species causing *Phytophthora* root rot in rhododendron [WWW Document]. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-22-2670-RE>
- Scanu, B., Linaldeddu, B.T., Deidda, A., Jung, T., 2015. Diversity of *Phytophthora* Species from Declining Mediterranean Maquis Vegetation, including Two New Species, *Phytophthora crassamura* and *P. ornamentata* sp. nov. *PLOS ONE* 10, e0143234. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143234>
- Schreefel, L., Schulte, R.P.O., de Boer, I.J.M., Schrijver, A.P., van Zanten, H.H.E., 2020. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Glob. Food Secur.* 26, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>
- Schroth, G., Harvey, C.A., 2007. Biodiversity conservation in cocoa production landscapes: an overview. *Biodivers. Conserv.* 16, 2237–2244. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9195-1>
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Duarte, J.A., Vohland, K., n.d. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics 43.
- Scott, P., Bader, M.K.-F., Burgess, T., Hardy, G., Williams, N., 2019. Global biogeography and invasion risk of the plant pathogen genus *Phytophthora*. *Environ. Sci. Policy* 101, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.08.020>
- Seghier, J., Harmand, J.-M., 2019. Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale. éditions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3059-4>
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G.P.S., Handa, N., Kohli, S.K., Yadav, P., Bali, A.S., Parihar, R.D., Dar, O.I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., 2019. Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Appl. Sci.* 1, 1446. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1>
- Sharma, P.K., Goyalwal, R., 2017. *Trichoderma*: A Potent Fungus as Biological Control Agent, in: Singh, J.S., Seneviratne, G. (Eds.), *Agro-Environmental Sustainability: Volume 1: Managing Crop Health*. Springer International Publishing, Cham, pp. 113–125. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2_6
- Shelley, B.A., Luster, D.G., Garrett, W.M., McMahon, M.B., Widmer, T.L., 2018. Effects of temperature on germination of sporangia, infection and protein secretion by *Phytophthora kernoviae*. *Plant Pathol.* 67, 719–728. <https://doi.org/10.1111/ppa.12782>
- Shepherd, K.D., Walsh, M.G., 2002. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 988–998. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9880>
- Shukla, A., Kumar, A., Jha, A., Chaturvedi, O.P., Prasad, R., Ajit Gupta, 2009. Effects of shade on arbuscular mycorrhizal colonization and growth of crops and tree seedlings in Central India. *Agrofor. Syst.* 76, 95–109. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9182-x>
- Smith, G.S., Teague, P.W., 1989. Economic Thresholds for *Phytophthora* Foot Rot of Citrus Using Estimates of Value of Tree Loss and Chemical Control Costs. *J. Prod. Agric.* 2, 184–189. <https://doi.org/10.2134/jpa1989.0184>
- Somarriba, E., Beer, J., 2011. Productivity of *Theobroma cacao* agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agrofor. Syst.* 81, 109–121. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9364-1>
- Somarriba, E., Zamora, R., Barrantes, J., Malek, M., Vargas, E., Cerda, R., Quesada, F., n.d. ShadeMotion 4 . 0 . The simulation of spatial and temporal patterns of shade in wooded terrain 1–40.

- Sonwa, D.J., Nkongmeneck, B.A., Weise, S.F., Tchatat, M., Adesina, A.A., Janssens, M.J., 2007. Diversity of plants in cocoa agroforests in the humid forest zone of Southern Cameroon. *Biodivers. Conserv.* 16, 2385–2400.
- Sonwa, D.J., Weise, S.F., Nkongmeneck, B.A., Tchatat, M., Janssens, M.J.J., 2017. Structure and composition of cocoa agroforests in the humid forest zone of Southern Cameroon. *Agrofor. Syst.* 91, 451–470. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9942-y>
- Sonwa, D.J., Weise, S.F., Schroth, G., Janssens, M.J.J., Howard-Yana Shapiro, 2014. Plant diversity management in cocoa agroforestry systems in West and Central Africa—effects of markets and household needs. *Agrofor. Syst.* 88, 1021–1034. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9714-5>
- Sood, K.K., Mitchell, C.P., 2009. Identifying important biophysical and social determinants of on-farm tree growing in subsistence-based traditional agroforestry systems. *Agrofor. Syst.* 75, 175–187. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9180-z>
- Souza, H.N. de, de Goede, R.G.M., Brussaard, L., Cardoso, I.M., Duarte, E.M.G., Fernandes, R.B.A., Gomes, L.C., Pulleman, M.M., 2012. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agric. Ecosyst. Environ.* 146, 179–196. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.007>
- Spada, F.L., Stracquadiano, C., Riolo, M., Pane, A., Cacciola, S.O., 2020. A Complex Interaction System for Understanding the Ability of *Trichoderma* to Trigger Defenses in Tomato Plants Challenged by *Phytophthora nicotianae*. *Biol. Life Sci. Forum* 4, 47. <https://doi.org/10.3390/IECPS2020-08632>
- Spreen, T.H., 2001. Projections de la production et de la consommation mondiales d'agrumes en 2010 10.
- Spreen, T.H., Gao, Z., Fernandes, W., Zansler, M.L., 2020. Global economics and marketing of citrus products, in: *The Genus Citrus*. Elsevier, pp. 471–493. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00023-1>
- Srinivasan, S., Vinothkumar, V., Murali, R., 2019. Antidiabetic Efficacy of Citrus Fruits With Special Allusion to Flavone Glycosides, in: *Bioactive Food as Dietary Interventions for Diabetes*. Elsevier, pp. 335–346. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813822-9.00022-9>
- Stamps, D.J., Waterhouse, G.M., Newhook, F.J., Hall, G.S., 1990. Revised tabular key to the species of *Phytophthora*. *Mycol. Pap.*
- Sumida, C.H., Fantin, L.H., Braga, K., Canteri, M.G., Homechin, M., 2020. Control of root rot (*Phytophthora cinnamomi*) in avocado (*Persea Americana*) with bioagents. *Summa Phytopathol.* 46, 205–211. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/192195>
- Tada, T., Tanaka, C., Katsube-Tanaka, T., Shiraiwa, T., 2021. Effects of wounding and relative humidity on the incidence of *Phytophthora* root and stem rot in soybean seedlings. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 116, 101737. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101737>
- Tadom, D., Kamgang-Youbi, G., Acayanka, E., Njoyim-Tamungang, E., Laminsi, S., 2018. Reduction of sludge formed during a coagulation treatment of Ridomil Gold by means of non-thermal quenched plasma pre-treatment. *Environ. Monit. Assess.* 190, 443. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6824-y>
- Talon, M., Wu, G.A., Gmitter, F.G., Rokhsar, D.S., 2020. The origin of citrus, in: *The Genus Citrus*. Elsevier, pp. 9–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00002-4>
- Tariq, H., Rajput, N., Atiq, M., Sahi, S., Rehman, A., Rashid, A., Khan, A., Hameed, A., Modassar, W., 2021. Resistance Assessment of Citrus Varieties against Gummosis Disease caused by *Phytophthora nicotianae* under Natural Field Conditions. *Pak. J. Agric. Res.* 34. <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2021/34.4.824.829>
- Tariq, M., Khan, A., Asif, M., Khan, F., Ansari, T., Shariq, M., Siddiqui, M.A., 2020. Biological control: a sustainable and practical approach for plant disease management. *Acta Agric. Scand. Sect. B — Soil Plant Sci.* 70, 507–524. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1784262>
- Tassin, J., 2011. quand l'agro-écologie se propose d'imiter la nature 10.

- Tayyab, M., Islam, W., Lee, C.G., Pang, Z., Khalil, F., Lin, S., Lin, W., Zhang, H., 2019. Short-term effects of different organic amendments on soil fungal composition. *Sustain. Switz.* 11. <https://doi.org/10.3390/su11010198>
- Tchameni, S.N., Ngonkeu, M.E.L., Begoude, B.A.D., Wakam Nana, L., Fokom, R., Owona, A.D., Mbarga, J.B., Tchana, T., Tondje, P.R., Etoa, F.X., Kuate, J., 2011. Effect of *Trichoderma asperellum* and arbuscular mycorrhizal fungi on cacao growth and resistance against black pod disease. *Crop Prot.* 30, 1321–1327. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.05.003>
- Temple, L., 2001. Quantification des productions et des échanges de fruits et légumes au Cameroun. *Cah. Agric.* 10, 87–94.
- Tennant, P.F., Robinson, D., Fisher, L., Bennett, S.-M., Hutton, D., Coates-Beckford, P., Mc Laughlin, W., 2009. Diseases and Pests of Citrus (*Citrus* spp.). *Tree For. Sci. Biotechnol.* 3, 81–107.
- Tian, Y., Yu, D., Liu, N., Tang, Y., Yan, Z., Wu, A., 2020. Confrontation assays and mycotoxin treatment reveal antagonistic activities of *Trichoderma* and the fate of *Fusarium* mycotoxins in microbial interaction. *Environ. Pollut.* 267, 115559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115559>
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Timmer, L.W., Mondal, S.N., Peres, N.A.R., Bhatia, A., 2004. Fungal Diseases of Fruit and Foliage of Citrus Trees, in: Naqvi, S.A.M.H. (Ed.), *Diseases of Fruits and Vegetables Volume I*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 191–227. https://doi.org/10.1007/1-4020-2606-4_3
- Toghueo, R.M.K., Eke, P., Zabalgoceazcoa, Í., de Aldana, B.R.V., Nana, L.W., Boyom, F.F., 2016. Biocontrol and growth enhancement potential of two endophytic *Trichoderma* spp. from *Terminalia catappa* against the causative agent of Common Bean Root Rot (*Fusarium solani*). *Biol. Control* 96, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.01.008>
- Tondje, P.R., Roberts, D.P., Bon, M.C., Widmer, T., Samuels, G.J., Ismaiel, A., Begoude, A.D., Tchana, T., Nyemb-Tshomb, E., Ndoumbe-Nkeng, M., Bateman, R., Fontem, D., Hebbbar, K.P., 2007. Isolation and identification of mycoparasitic isolates of *Trichoderma asperellum* with potential for suppression of black pod disease of cacao in Cameroon. *Biol. Control* 43, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.08.004>
- Tran, T.T.T., Vu, T.T.H., Nguyen, T.H., 2013. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Tithonia diversifolia* leaf extract and their antimicrobial activity. *Mater. Lett.* 105, 220–223. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.04.021>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S.A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Jührbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., Wanger, T.C., 2011. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - A review. *J. Appl. Ecol.* 48, 619–629. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>
- Turner, R.S., 2005. After the famine: Plant pathology, *Phytophthora infestans*, and the late blight of potatoes, 1845—1960. *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.* 35, 341–370. <https://doi.org/10.1525/hsps.2005.35.2.341>
- Turner, T., Burri, B.J., 2013. Potential nutritional benefits of current citrus consumption. *Agric. Switz.* 3, 170–187. <https://doi.org/10.3390/agriculture3010170>
- van Jaarsveld, E., Wingfield, M.J., Drenth, A., 2002. Evaluation of Tobacco Cultivars for Resistance to Races of *Phytophthora nicotianae* in South Africa. *J. Phytopathol.* 150, 456–462. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.2002.00766.x>
- Vanegas, D.M., Navarro, R.A., Alfánador, L., Gutierrez, J.A., Morales, J.G., Gaviria, B.M., 2022. Characterization of *Phytophthora nicotianae* isolates from tobacco plants (*Nicotiana tabacum*) in Colombia. *Rev. Ceres* 69, 78–91. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269010011>

- Vestberg, M., Kukkonen, S., Rantala, S., Prochazka, P., Tuohimetsä, S., Setälä, H., Romantschuk, M., Kurola, J., Yu, D., Parikka, P., 2011. SUPPRESSIVENESS OF FINNISH COMMERCIAL COMPOST AGAINST SOIL BORNE DISEASE. *Acta Hortic.* 59–65. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.891.5>
- Vicent, A., Botella-Rocamora, P., López-Quílez, A., de la Roca, E., Bascón, J., García-Jiménez, J., 2012. Relationships between agronomic factors and epidemics of *Phytophthora* branch canker of citrus in southwestern Spain. *Eur. J. Plant Pathol.* 133, 577–584. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9930-z>
- Virk, G.S., Nagpal, A., 2012. Citrus diseases caused by *Phytophthora* species 10.
- Wagh, S.P., Gade, R.M., Lad, R.S., Adinarayana, J., Phanindra, K.B.V.N., 2018. Epidemiological relations to population dynamics of *Phytophthora* spp. in Mandarin. *Indian Phytopathol.* 71, 213–218. <https://doi.org/10.1007/s42360-018-0035-x>
- Wang, Y., Meng, Y., Zhang, M., Tong, X., Wang, Q., Sun, Y., Quan, J., Govers, F., Shan, W., 2011. Infection of *Arabidopsis thaliana* by *Phytophthora parasitica* and identification of variation in host specificity. *Mol. Plant Pathol.* 12, 187–201. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00659.x>
- WATERHOUSE, G., 1963. Key to the species of *Phytophthora* de Bary. *Commonw. Mycol. Inst. Kew UK Mycol Pap.* 92, 22.
- Wolf, E.J., Harrington, K.M., Clark, S.L., Miller, M.W., 2013. Sample Size Requirements for Structural Equation Models: An Evaluation of Power, Bias, and Solution Propriety. *Educ. Psychol. Meas.* 73, 913–934. <https://doi.org/10.1177/0013164413495237>
- Wu, E.-J., Wang, Y.-P., Yang, L.-N., Zhao, M.-Z., Zhan, J., 2022. Elevating Air Temperature May Enhance Future Epidemic Risk of the Plant Pathogen *Phytophthora infestans*. *J. Fungi* 8, 808. <https://doi.org/10.3390/jof8080808>
- Yang, X., Tyler, B.M., Hong, C., 2017. An expanded phylogeny for the genus *Phytophthora*. *IMA Fungus* 8, 355–384. <https://doi.org/10.5598/imafungus.2017.08.02.09>
- Zadoks, J.C., 2001. Plant Disease Epidemiology in the Twentieth Century: A Picture by Means of Selected Controversies. *Plant Dis.* 85, 808–816. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.8.808>
- Zapata-Sarmiento, D.H., Palacios-Pala, E.F., Rodríguez-Hernández, A.A., Medina Melchor, D.L., Rodríguez-Monroy, M., Sepúlveda-Jiménez, G., 2020. *Trichoderma asperellum*, a potential biological control agent of *Stemphylium vesicarium*, on onion (*Allium cepa* L.). *Biol. Control* 140, 104105. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104105>
- Zapfack, L., Engwald, S., Sonke, B., Achoundong, G., Madong, B.A., 2002. The impact of land conversion on plant biodiversity in the forest zone of Cameroon. *Biodivers. Conserv.* 11, 2047–2061. <https://doi.org/10.1023/A:1020861925294>
- Zhang, Q., Feng, R., Zheng, Q., Li, J., Liu, Z., Zhao, D., Meng, Y., Tian, Y., Li, W., Ma, X., Wang, S., Shan, W., 2019. Population Genetic Analysis of *Phytophthora parasitica* From Tobacco in Chongqing, Southwestern China. *Plant Dis.* <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-18-0879-RE>
- Zhang, R., Wang, W., Liu, H., Wang, D., Yao, J., 2020. Field evaluation of sunflower as a potential trap crop of *Lygus pratensis* in cotton fields. *PLoS ONE* 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237318>
- Zhou, C., da Graça, J.V., Freitas-Astúa, J., Vidalakis, G., Duran-Vila, N., Lavagi, I., 2020. Chapter 19 - Citrus viruses and viroids, in: Talon, M., Caruso, M., Gmitter, F.G. (Eds.), *The Genus Citrus*. Woodhead Publishing, pp. 391–410. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00019-X>

Annexes



Farmer's strategies in the choice of citrus spatial structures in cocoa-based agroforests in Cameroon

Eunice Golda Danièle Ndo · Etienne Akoutou Mvondo ·
Lucien Bidzanga Nomo · Faustin Bella Manga · Zachée Ambang ·
Christian Cilas

Received: 30 August 2021 / Accepted: 27 January 2023
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature B.V. 2023

Abstract The involvement of spatial structure in pathogen regulation in complex and biodiverse agroforests has been demonstrated in several studies. It is thus recognized that the aggregated spatial structure of host populations leads to the rapid dispersion of pathogens. To lead farmers to adopt regular spatial structures that are less conducive to pathogen dispersal, an upstream understanding of the reasons for adopting existing spatial structures is crucial. To this end, semi-structured surveys were conducted among farmers in four citrus production basins in the humid forest zones of Cameroon. The farmer's profile was drawn up and cocoa-based agroforestry systems (CBAS) management strategies in relation to the spatial structure were examined. Subsequently, CBAS were mapped and the effective citrus spatial structure within them was analyzed using the Ripley

method. The involvement of endogenous and exogenous factors determining citrus spatial structure was highlighted. It was found that citrus spatial structures reported by farmers and checks on the CBAS showed inconsistencies. Somehow beyond the farmers' control, endogenous factors such as the number of individuals and species diversity of the plant stand, are the ones that determine citrus spatial structures in the CBAS. It, therefore, appears that citrus spatial structures in the CBAS are more related to the structural characteristics of the systems than to the farmer's deliberate action. Appropriate spatial structures can be adopted, provided that farmers are well-informed and trained in modern agroforestry techniques.

Keywords Agroforestry · Farm management · Indigenous knowledge · Spatial structure · $L(r)$ function · Citrus

E. G. D. Ndo · E. Akoutou Mvondo (✉) ·
L. Bidzanga Nomo · F. Bella Manga
Regional Centre for Agricultural Research of Mbalmayo,
Institute of Agricultural Research for Development
(IRAD), P.O. Box 2123, Yaoundé, Cameroon
e-mail: etienneakoutou@gmail.com

E. Akoutou Mvondo · Z. Ambang
Faculty of Science, University of Yaoundé I, P.O. Box 812,
Yaoundé, Cameroon

C. Cilas
CIRAD (Centre de coopération Internationale en
Recherche Agronomique pour le Développement),
DGDRS, 34398 Montpellier, France

Introduction

Agroforestry refers to traditional land use patterns covering a general concept of introducing trees into crop and livestock systems and achieving multifunctionality. Leakey (2017) defines the agroforestry concept as a dynamic and ecologically sound natural resource management system that, through the integration of trees into agricultural and rangeland lands, diversifies and sustains smallholder production for increased socio-economic

and environmental benefits. Generally practiced in small areas, agroforestry systems are very important for rural populations in both temperate and tropical regions. They provide food security, and income diversification, and play a key role in environmental protection (Cerdeja et al. 2014; Somarriba et al. 2014; Mbolo et al. 2016). Agroforests are therefore to date, considered the closest agroecosystems to natural ecosystems in terms of structure and function (Schroth and Harvey 2007). In recent decades, various studies have extensively described and characterized the structure of agroforests based on understory crops, such as cocoa (Gidoïn et al. 2014; Mvondo et al. 2022).

Cocoa-based agroforestry systems (CBAS), illustrated in Fig. 1, are widely spread in sub-Saharan Africa and particularly in the main cocoa-producing countries such as Ivory Coast, Ghana, Nigeria, and Cameroon (Asigbaase et al. 2019; Kaba et al. 2020; Kouassi et al. 2021; Arimi and Omoare 2021). Thus, in addition to cocoa production, CBAS provides an innumerable number of other services (Jagoret et al. 2014a; Mortimer et al. 2018). Indeed CBAS can provide supporting services such as optimum light conditions for cocoa trees growth, water, and nutrient cycling, and regulating services such as pest and

disease control and microclimate regulation (Mortimer et al. 2018).

Since its introduction in Cameroon around 1886, CBAS has been the major cocoa production system, and provides all of the main production of some fruit trees (Gockowski et al. 2010). In the humid forest zones of Cameroon, CBASs are rich in biodiversity (Gidoïn 2013a, b; Jagoret et al. 2014a; Akoutou Mvondo et al. 2019; Manga Essouma et al. 2020; Mvondo et al. 2022). In general, associated species with cocoa are conserved or planted for their potential in diversifying household incomes; their ability to improve soil fertility or provide shade for cocoa trees, and many other socio-economic reasons (Sonwa et al. 2007; Jagoret et al. 2014b). In these CBAS, apart from cocoa trees, palm trees, forest trees, fruit trees, and various food crops are cultivated (Abada Mbolo et al. 2016; Akoutou Mvondo et al. 2020). Fruit trees which belong to different families and species are one of the key components of CBAS in the humid forest zones of Cameroon. Fruit trees represent 80% of the total agro-biodiversity of CBAS in some localities such as Bokito, situated in a forest-savannah transition zone (Jagoret et al. 2014a; Ndo et al. 2019a; Akoutou Mvondo et al. 2020; Ndo and Akoutou 2021). These farms' main fruit species inventoried are *Citrus* spp., *Mangifera indica*, *Dacryodes edulis*, *Elaeis*



Fig. 1 Typical complex and biodiverse cocoa-based agroforestry system in Central Cameroon

guineensis, *Persea americana*, and *Cola nitida*. CBAS is thus recognized as the most important citrus production system in the humid forest zones of Cameroon (Ndo 2011; Ndo et al. 2023).

In CBAS, the species choice and distribution are based on farmers' strategies (Sonwa et al. 2007, 2014). The high biodiversity that agroforests abound in, imposes not only diversified functionalities on them but also quite varied plant stand structures. The spatial structure, which is an important structural feature, is the basis for the dynamic processes that determine the evolution of the ecosystems (Goreaud and Pelissier 2000). The analysis of CBAS spatial structures was the subject of numerous studies in the humid forest zones of Cameroon (Ndo 2011; Babin et al. 2011; Gidoïn 2013a, b; Akoutou Mvondo et al. 2019, 2020). Most of this work was carried out to understand the mechanisms of dispersal of pests and diseases in these complex ecosystems, to define integrated management strategies and improve their structures (Ndo 2011; Gidoïn et al. 2014; Akoutou Mvondo et al. 2019; Mvondo et al. 2022).

For fruit trees, it has been shown that their spatial structure in CBAS is generally random and, in some cases regular or aggregate (Gidoïn 2013a, b). Indeed, their arrangement in the plot is consistent with that of forest trees, which have a rather random spatial structure (Ndo 2011). In the particular case of citrus, they generally adopt the three spatial organization patterns (aggregate, regular, and random). However, random and aggregate spatial structures are the most frequent (Ndo 2011; Ndo et al. 2019a, b; Akoutou Mvondo et al. 2019, 2020).

Previous works have shown that random and mainly aggregate spatial structures are those that favor the dispersal of the main diseases and pests affecting citrus into CBAS (Ndo et al. 2019a, b; Akoutou Mvondo et al. 2020). It is therefore necessary to improve existing spatial structures or to encourage the adoption of spatial structures that are less conducive to pest spread. The optimization of spatial structure schemes in the CBAS depends on an upstream understanding of the reasons for the adoption of existing structures by farmers. It is with this in mind that this work has been done as well.

Materials and methods

Description of citrus production basins

The study was conducted in the bimodal rainfall pattern in the humid forest zone of Cameroon (latitude 2.6° N to 4.54°/5.48° N, longitude 10.30° E to 16.12° E, altitude: 500–1,000 m). The climate in this area is hot and humid with an average temperature of about 25 °C; and an average relative humidity of 75%. There are two rainy seasons (March to June and September to November). The soils are sandy loam, sandy clay loam, or clay in texture. The work was done in four citrus production basins namely Bokito, Evodoula, Boumnyebel, and Bikok.

- Bokito (latitude 4.56°N, longitude 11.09° E, altitude: 488 m) is a forest-savannah transition zone, located 146 km away from Yaoundé, the main city of Cameroon. This citrus production basin is located in the administrative department of Mbam and Inoubou. The average annual rainfall is 1300 mm, with an average temperature of 25.2 °C and an average relative humidity of 75%. Seven CBASs were selected in this citrus production basin;
- Evodoula (latitude 4°06' to 4°53' N, longitude 11°14' to 11°16' E, altitude: 520–541 m) is a degraded forests zone, located nearly 60 km away from Yaoundé. This citrus production basin is located in the administrative department of Lékié. The average annual rainfall is 1727 mm, with an average temperature of 23 °C and an average relative humidity of 80%. Seven CBASs were selected;
- Boumnyebel (latitude 3°53' N, longitude 10°45' to 10°46' E, altitude: 199–215 m), is situated in the dense forest zone, located about 120 km from Yaoundé and 146 km from Douala. This citrus production basin is located in the administrative department of Nyong and Kelle. The average annual rainfall is 1767 mm, with an average temperature of 23.3 °C and an average relative humidity of 82%. Five CBASs were selected in the locality;
- Bikok (latitude 3°34' to 3°35' N, longitude 11°26' to 11°27' E, altitude: 680–703 m) is situated in the dense forest zone, located 46 km away from Yaoundé. This citrus production

basin is located in the Department of Mefou and Akono. The average annual rainfall is 1727 mm, with an average temperature of 23 °C and an average relative humidity of 80%. Seven CBASs were selected.

The climatic and soil conditions within each citrus production basin are rather homogeneous and thereby can ensure similarly high levels of production. These four citrus production basins were chosen because they are situated in the main citrus production localities of Cameroon. These areas supply fresh fruits to Yaoundé and Douala's markets and other countries in the Sub-Region (Temple 2001).

Farmer's profile

In the four study citrus production basins, 26 farmers were interviewed. Verbal informed consent was obtained before the interview. To draw up a farmer's profile, they were asked about their main activity (agriculture, handicrafts, trade, public service, or other paid employment), and the number of years spent in CBAS management. They were asked if they had any training in agricultural trades and how they acquired their CBAS. Finally, the mode of citrus tree introduction in the farm (spontaneous regeneration, planting by the producer) was assessed, and the average number of citrus trees (the number of individuals) per hectare was estimated.

Farmer's strategies in the choice of citrus spatial structures

Strategies in the choice of trees' spatial structure originate from the complexity of factors that could be exogenous (pedoclimatic, farm management) and endogenous (stand composition, regeneration mode) (Gidoïn 2013a, b). The survey enabled an understanding of the reasons leading to the choice of citrus spatial structures in CBAS. In this study, the focus was on endogenous factors, and farm management (exogenous factor), that can directly influence the spatial arrangement of citrus trees on the plot. Reasons leading to the choice of citrus trees' position in the CBAS such as land limitation, shade management, and dead tree replacement were evaluated about the different spatial structure patterns of citrus trees (random, aggregated, and regular).

Cocoa-based agroforest systems mapping

Citrus trees data collection and CBAS mapping were done in 26 plots owned by the surveyed farmers. In each plot, a 2500 m² elementary plot was delineated. Using a Leica TCR 703 Total Station, plot mapping was done with X and Y Cartesian coordinates of all perennial plants with height ≥ 2 m (Gidoïn 2013a, b). CBAS mapping consists of acquiring spatial and structural data on the different individuals that make up the plant stand to analyze the interactions that take place there. To map a CBAS, the highest point of the plot, or failing that, the point in the plot from which a maximum number of individuals (plants) could be observed was sought. Once targeted, a first station (S1) was set up by upgrading the Total Station. Subsequently, a first point (P1) was targeted at 50 m. The GPS coordinates of S1 and P1 (Longitude, Latitude, and Altitude) were noted as well as the triangular coordinates of P1 (Hz: which represents the angle of an inclination concerning the baseline: here 0; and D: the horizontal distance between S1 and P1). The mapping was done in prism mode. This requires that the optical prism, carried by a 1.30 m pole, be moved from tree to tree to record its position. Total Station measures the horizontal distance *D* from station point *S* (location of the total station) to the target (tree). This implies that the station point must be visible to aim at the prism placed at the foot of the target.

If possible, only one station was made. If not, two or more station points were made and the baseline was recorded each time the total station was moved from one station point to another. For station point S1 for example, the baseline placed at 50 m from the total station was marked with a tape measure. Then, one person fixed at point S1 took the measurements with the Total Station and the other moved the prism from tree to tree. The positions (Hz and D) of all plant stand with a diameter at breast height (DBH) ≥ 10 cm were recorded. For each stand selected, the species and family names were identified. For each individual, the family and species names were identified. Five groups, also called "subpopulations" were previously defined (cocoa trees, forest trees, other fruit trees, citrus trees, and oil palm) (Ndo 2011; Gidoïn 2013a, b; Ndo et al. 2019a, b; Akoutou Mvondo et al. 2019).

Data analysis

Spatial structure analysis

Citrus spatial structure analysis in each plot was done by Ripley's method, using the modified Besag $L(r)$ function illustrated in Eq. 1a, b (Goreaud and Pelissier 2000). For the Poisson process (random distribution), which serves as the null hypothesis, the expectation of the number of neighbors $E(r)=\lambda\pi r^2$, and thus $K(r)=\pi r^2$. For an aggregate process, points have more neighbors on average than for the null hypothesis, and thus $K(r)>\pi r^2$. Conversely, for a regular process, the points will have fewer neighbors on average than for the null hypothesis, and $K(r)<\pi r^2$, K is the expectation of the number of neighbors around each point (each tree). K regular $<$ K random $<$ K aggregate (Goreaud and Pelissier 2000; Gidoïn 2013a, b; Ngo Bieng et al. 2013).

$$K(r) = \lambda^{-1} E(r) \quad (1a)$$

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r \quad (1b)$$

In this equation, $E(r)$ is the expectation of the number of points within a distance r of any point of the point cluster. The average intensity of the points λ can be estimated by their density n/A , where n is the total number of points and A is the total area sampled.

The function $K(r)$ is not easy to interpret because the curve obtained for the null hypothesis is a parabola, $L(r)$ derived from it was used (Eq. 1).

$L(r)=0$ indicates random distribution, $L(r)>0$: aggregated distribution, $L(r)<0$: regular distribution.

In the second step, a hierarchical cluster analysis based on the Euclidean distance between the $L(r)$ function values of citrus trees from different plots was performed.

Typology of spatial structures and biodiversity of CBAS

For each of the 26 CBAS, the citrus $L(r)$ function was calculated for intervals of $r=5$ m, ranging from 1 to 25 m. The chosen r corresponded to the local environment, i.e., the area within a short or medium distance from each individual. Subsequently, we tried

to account for interactions between citrus trees and to decrease the edge correction effect, which can be significant at larger distances (Gidoïn 2013a, b; Ngo Bieng et al. 2013; Kan et al. 2021).

For each plot, we obtained a matrix of 25 variables and considered 6 values for characterizing $L(r)$. These 6 variables were used to construct a typology based on spatial structure and allowed us to compare the three aggregated, random, and regular spatial structures. The analysis of the spatial structure of the CBAS and the hierarchical ascending classification was done using the R 4.0.3 application. The packages *ads* and *ade4* were used to develop these analyses.

The Shannon (H') index was used to measure the specific diversity of CBAS, with the Eq. (2). In this formula, n_i is the number of individuals of the species i , and N : is the total number of individuals.

$$H' = - \sum [(n_i/N) \times \log_2 (n_i/N)] \quad (2)$$

Comparison of reported and calculated citrus spatial structures in CBAS.

The Ascending Hierarchical Classification, allowed us to classify the plots according to their spatial structure of citrus stands. Subsequently, these real spatial structures were compared with the structures declared by the farmers. The rate of coincidence or correspondence (C) between the real structures adopted and those declared by the producers was calculated by the formula (3)

$$C(\%) = \left(\frac{p_i}{P_i} \right) * 100 \quad (3)$$

with p_i : the number of CBAS whose spatial structure i actually ds to the one declared by the producer and P_i : the total number of CBAS having the spatial structure.

Principal component analysis

Descriptive analyses were done on Excel 2019 spreadsheet. The Principal Component Analysis (PCA) was done using the Xlstat 2020 extension. The objective of this analysis was to establish correlations between endogenous variables (number of cocoa trees, forest trees, other fruit trees, citrus trees; and the biodiversity index H') and CBAS management. This correlation

may influence the adoption of citrus spatial structures in CBAS.

Results

Farmer's profile description

The age of the farmers surveyed ranged from 20 to 79 years, with an average of 50. More than 65% of the farmers surveyed have farming as their main activity and in general, have been managing their CBAS for an average of 24 years. The majority of farmers have no professional training in agricultural trades but manage their CBAS empirically or traditionally. Most farmers acquired their plots through inheritance, and citrus trees in their farms were exclusively introduced (Table 1).

Farmers' knowledge of the adoption of spatial structures in CBAS

Of the 26 farmers surveyed, nearly 77% said they were familiar with the concept of tree spatial structure in their CBAS, while only 23% said they were not. Of those who reported knowing the spatial structure adopted by citrus in their CBAS, more than half

(52%) reported choosing a regular spatial structure; 19% reported aggregate structures, and only 15% reported adopting random structures. Across the sample, 77% of the farmers surveyed reported knowing the extent and type of spatial structure adopted by citrus in their CBAS.

Upon analysis of the actual spatial structures, these statements were found to be inconsistent with the real spatial structures adopted in the CBAS. Indeed, random spatial structures were predominant in 65% of CBAS (Fig. 2). For this type of structure, a coincidence rate of 25% was observed. For the aggregated spatial structure, a rate of 28% was observed in CBAS and 33% for regular CBAS. Thus, overall, we have rates below 50%. This proves a low control of spatial structures adopted by farmers (Table 2).

Tree diversity and biodiversity in CBAS

The 5 sub-populations studied in the CBAS were present in all citrus production basins. Cocoa trees being the main crop, they are predominant in all CBAS, but with variable proportions. Forest and fruit trees are the predominantly associated trees in Bikok, while in Boumnyebel, other fruit trees were predominant. Citrus trees are predominant in terms of the percentage

Table 1 Surveyed citrus farmers' profiles

Variables	Modalities	Percentage of farmers (%)
Age (years)	Minimum	20
	Mean	50
	Maximum	79
Main activity (%)	Business	7.69
	Craftsman	11.54
	Farmer	65.38
	Other	15.38
Former CBAS management (years)	Min	2
	Medium	24
	Max	49
Training in farming skills (%)	Yes	42.31
	No	57.69
CBAS acquisition mode (%)	Created	26.92
	Legacy	65.38
	Leasing	7.69
The average number of citrus trees per hectare		134.62

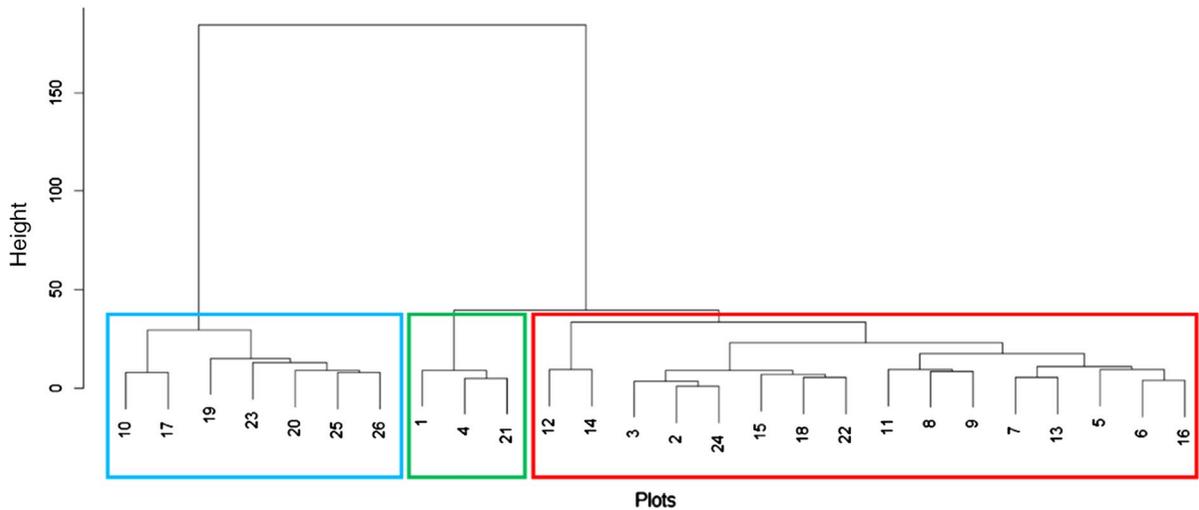


Fig. 2 Dendrogram illustrating the distribution of CBAS according to the spatial structure of citrus trees. The blue frame groups CBAS with an aggregated spatial structure, the

green frame those with a regular spatial structure, while the red frame groups CBAS with a random spatial structure

Table 2 Comparison between the types of citrus spatial structure reported by farmers and those actually adopted in CBAS

Spatial structure type	Real spatial structure (%)	Reported spatial structure (%)	Coincidence rate (%)
Aggregate	26.92	19.23	28.57
Random	61.54	15.38	25
Regular	11.54	42.31	33.33
Not stated	0	23.08	

of associated trees only in Bokito. The average number of individuals in the CBAS and the number of species are high in Bikok and Evodoula citrus production basins respectively. In Bokito, a high number of individuals in the CBAS was observed, within a few species; while in Boumnyebel, it is the opposite.

The Shannon index reveals that the CBAS of Bikok ($H' = 0.56$) and Boumnyebel ($H' = 0.55$) are the most biodiverse, unlike those of Evodoula and Bokito with a $H' = 0.38$ (Table 3). Apart from the high density of cocoa trees, sown at more or less regular distances, several other sub-populations of individuals are observed. These sub-populations represent individuals from various families.

Description of citrus sub-population distribution

Five citrus species are present in the studied citrus production basins. These are orange (*Citrus sinensis*), tangerine (*C. reticulata*), pummelo (*C. paradisi*), lemon (*C. volcameriana*), and lemon trees (*C. lemon*). The Bokito and Bikok have the highest density of citrus trees, with 39.74% and 23.01% of trees respectively observed in CBAS. Tangerine trees are the most observed species with 44.56% of individuals in all the citrus production basins. Tangerines predominate in Evodoula (63.44%) and Boumnyebel (44.71%). Orange trees in second place, are predominant in Bokito (59.47%) and Bikok (42.73%). Lemons are the minority species in these farms with values of 1.67% and 5.23% for *Citrus lemon* and *C. volcameriana* (Fig. 3).

Effect of exogenous factors in the adoption of citrus spatial structures in CBAS

Three exogenous factors were considered to explain farmers' choice of citrus spatial structures in CBASs. These factors include the positioning of citrus trees in the plot, the reason for the location, and the distance

between citrus trees (Table 4). For the positioning of citrus trees in the plot, more than 70% of farmers reported placing them anywhere, or in specific locations. Only 15% of farmers said they placed them at the edge of their plots.

As for the reasons for planting citrus trees, nearly 35% of farmers admitted to introducing citrus trees

Table 3 Characterization of subpopulations and specific diversity of CBAS in the Central-Cameroon

Sub-population	Occurrence			
	Bikok	Bokito	Boumnyebel	Evodoula
Citrus tree	110(5.62)	190(9.92)	85(7.76)	93(4.51)
Cocoa tree	1472(75.18)	1570(81.98)	805(73.52)	1745(84.67)
Forest tree	178(9.09)	56(2.92)	56(5.11)	107(5.19)
Other fruit tree	160(8.17)	76(3.97)	117(10.68)	98(4.75)
Palm tree	38(1.94)	23(1.20)	32(2.92)	18(0.87)
Mean number of individuals per CBAS	280	274	219	294
Nber of species	52	29	32	39
H'	0.56	0.38	0.55	0.38

Fig. 3 Number of citrus trees in CBAS in the citrus production basins

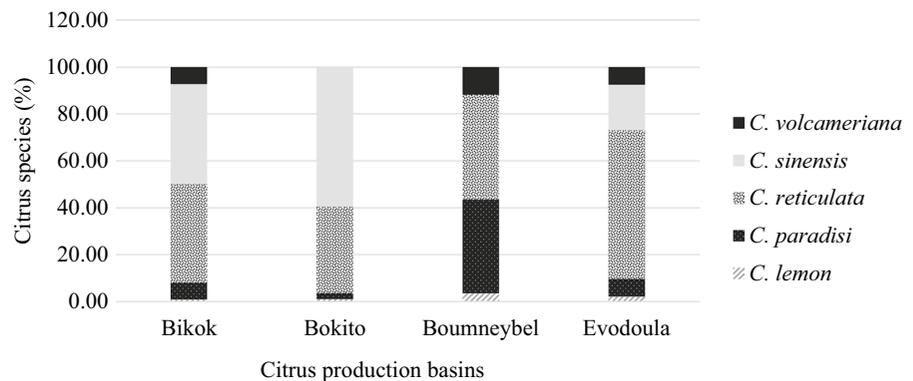


Table 4 L(r) values characterizing citrus spatial structure into cocoa-based agroforestry systems

L _(r)	Citrus spatial structure			Mean
	Regular	Random	Aggregate	
L ₍₁₎ citrus	-1.00 ± 0.00 ^{ab}	-0.91 ± 0.33 ^{ab}	0.43 ± 1.45 ^a	-0.56 ± 0.97 ^a
L ₍₅₎ citrus	-1.96 ± 2.69 ^a	-0.16 ± 1.38 ^{ab}	4.36 ± 1.73 ^{bc}	0.84 ± 2.74 ^{ab}
L ₍₁₀₎ citrus	0.13 ± 0.81 ^{ac}	0.29 ± 1.07 ^b	6.06 ± 2.70 ^{bc}	1.83 ± 3.06 ^b
L ₍₁₅₎ citrus	2.03 ± 0.12 ^{bc}	-0.11 ± 1.80 ^{ab}	6.77 ± 1.38 ^c	1.98 ± 3.41 ^b
L ₍₂₀₎ citrus	2.61 ± 0.88 ^c	-0.69 ± 1.14 ^{ab}	5.54 ± 1.37 ^{bc}	1.36 ± 3.01 ^{ab}
L ₍₂₅₎ citrus	3.05 ± 0.53 ^c	-1.36 ± 1.54 ^a	4.01 ± 1.03 ^b	0.59 ± 2.85 ^{ab}
<i>Anova/t-test</i>				
Df	5	5	5	5
F value	8.45	3.506	12.38	2.956
Pr(>F)	0.01	0.01	0.001	0.05

The variables L₍₁₎–L₍₂₅₎ are related to the spatial structure of citrus. Within the same column, values with the same letter are not significantly different (Tukey test at *p* < 0.05)

to replace dead trees; 27% said they were planted to mark the boundaries between plots and only 15% justified the location of citrus trees for uniformity of shade on the cocoa trees. The majority of farmers, over 57%, reported planting citrus trees far apart. However, 23% preferred to plant them at close intervals (Table 5).

Relationships between exogenous factors and the citrus spatial structure in CBAS were investigated (Fig. 4). Random spatial structures are correlated with random citrus spacing, dead tree replacement, and planting trees in non-specific locations in the

plot. Aggregate spatial structures are correlated with planting citrus trees close to each other, or planting at edges to limit plots. Finally, regular spatial structures are the result of planting citrus trees far apart from each other, in specific locations, and to achieve uniformity of shade in the plot.

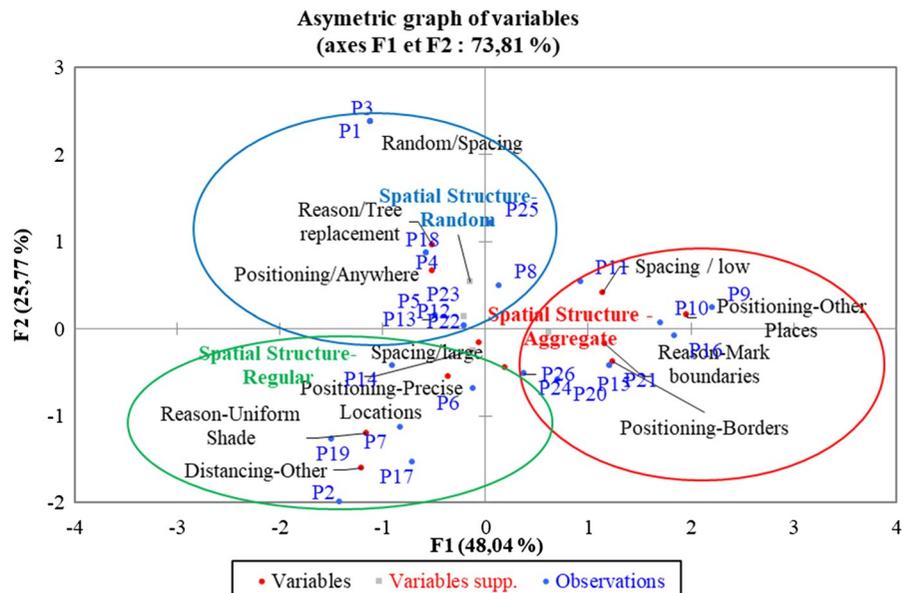
Endogenous factors determining the adoption of citrus spatial structures in CBAS

The five variables (the number of cocoa trees, citrus trees, forest trees, other fruit trees, and biodiversity)

Table 5 Description of exogenous factors related to citrus disposition in CBAS

Factors	Seeding methods	Percentage of answer (%)
Positioning of citrus trees in the plot	Not stated	7.692
	Plot borders	15.385
	At specific locations	38.462
	Anywhere	38.462
Reason for citrus location in the plot	Other reasons not stated	23.077
	Marking plot boundaries	26.923
	Replacing dead trees	34.615
	Uniform shade	15.385
Distancing of citrus	Randomly	7.692
	Other	11.538
	Distant from each other	57.692
	Close to each other	23.077

Fig. 4 Relationship between exogenous factors and the type of spatial structure of citrus in CBAS



used for the Principal Component Analysis were retained in the model and the percentage of variability represented on the first two variables (F1 and F2) is 70.59% (Fig. 5). The Pearson correlation matrix ($\alpha=0.05$) shows a significant negative correlation ($r=-0.729$) between the number of cocoa trees and the biodiversity index on the one hand, and a significant positive correlation ($r=0.706$). The biodiversity index and the number of forest trees are significantly positively correlated. These first two variables are weakly correlated with the number of citrus and fruit trees. They are significantly uncorrelated with the number of cocoa trees.

CBAS in the green circle is those in which citrus trees have a random spatial structure. Of these, P14, P5, and P11 are CBAS in which the density of cocoa trees is very high. Another group formed by P6, P3, and P2, which are CBAS in which not only is there a high density of cocoa trees, but also a very high number of citrus trees. These CBAS are therefore correlated with the citrus variable. Thus, the random spatial structure of citrus could be explained by the high density of cocoa trees on the one hand, and the high density of citrus trees in the CBAS on the other.

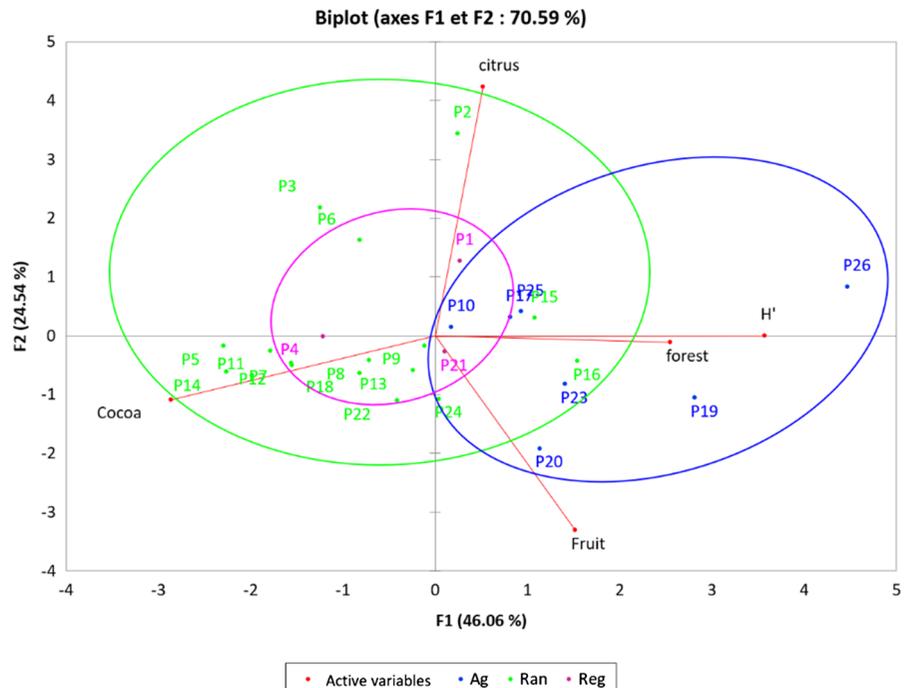
CBAS in blue is those in which citrus have an aggregated spatial structure. These CBAS are more

or less correlated with the biodiversity index and the number of forest trees in the CBAS. P20 and P23 are significantly correlated with the number of fruit trees. P19 and P26 are significantly correlated with the number of forest trees, which in this case is crucial for biodiversity in the CBAS. This also explains the correlation observed between these CBAS and H' . CBAS where citrus have a regular spatial structure (P4, P1, and P21) is linked to the center of the graph, which limits the interpretation of their trend (Fig. 5).

Discussion

In Cameroon, cocoa trees are generally grown in association with forest and fruit tree species that farmers preserve and plant after a partial forest clearing. Created in this way, CBAS are multispecies/multi-strata stands of high environmental, social and economic value. Species present and some of their uses have been determined through tree inventories (Jagoret et al. 2014c; Manga Essouma et al. 2020). In the present study, it has been shown that CBAS in Cameroon is managed by smallholder farmers, whose main activity is cocoa farm management. These stallholders have a significant experience in terms of

Fig. 5 Main endogenous factors determining the adoption of citrus spatial structure in cocoa-based agroforestry systems



time in managing CBAS. Indeed, as characterized by Jayne et al. (2010), these smallholders practice rain-fed agriculture, have limited access to conventional input, credit, and product markets, incur high transaction costs resulting in input and product market failures, and have fewer skills. Despite these disadvantages, however, they have proven to be efficient in their use of land and resources and are highly motivated to devote their time and money to their family farms. They are also characterized by diversification of income sources and crops, risk avoidance, efficient use of land and labor, and use of environmentally friendly farming methods (Delgado et al. 1997; Fule 2014).

Thus, several forest tree species are encountered in the CBAS studied. The number of species in the CBASs varies greatly from one farm to another and even from one citrus production basin to another. This specific diversity leads to a diversity of spatial structures that can be adopted by the sub-populations (Ndo 2011; Gidoïn 2013a, b; Akoutou Mvondo et al. 2020). High specific biodiversity, was thus observed and attests to the complexity of this system as demonstrated by Abada Mbolo et al. (2016) (2016). Our results showed low H' values ($0.33 \leq H' \leq 0.56$) in contrast to other work done in these same ecosystems (Jagoret et al. 2014b; Abada Mbolo et al. 2016). These low H' values could be explained on one hand, by the reduced value of our experimental units (2500 m²). On the other hand by the fact that the experimental CBASs were chosen based on their high citrus composition. In terms of the specific composition of the different sub-populations, a high variability in the composition of the CBAS was observed. In addition, a confirmation was done on an increasing gradient in the complexity and biodiversity of CBAS from the forest-savanna transition zone to the dense forest zone as shown by Jagoret et al. (2012, 2014a).

Spatial structure analysis reveals that citrus trees adopt all three spatial organization patterns in CBAS. Of the 26 CBAS studied, regular spatial structures were in the minority, and random ones predominated. These results corroborate those obtained in past works (Akoutou Mvondo et al. 2019, 2020 and Ndo et al. 2019a, b). High variability ($p = 0.001$) is observed for $L(r)$ values across spatial structure types. This variability could be explained by the method used in the spatial data collection. Also, the high variation in the number of individuals could explain this variability.

However, since citrus subpopulations in CBASs are primarily random, this may be explained by the heterogeneous distribution of resources induced by the random structure of indigenous forest trees subpopulations at the CBAS scale (González-Moreno et al. 2011). The random spatial structure within CBAS results in a variety of local environments that support the coexistence of different functional types (Gidoïn 2013a, b; Gidoïn et al. 2014). This mode of spatial organization could also contribute to increased the chances of survival of lower associated trees by limiting interspecific competition (Goreaud and Pelissier 2000). Thus, the random structure can be considered favorable to biodiversity. This could be confirmed by the natural distribution of species in the forest. Aggregate structures that are second in terms of representativeness can also be explained by this possibility in tropical forests for example, where trees are found in spatial niches favorable to their development (Ledo and Schnitzer 2014). Spatial niches encourage biodiversity and lead to intraspecific aggregation as well as interspecific segregation. By analogy, we can assume that the clustering of forest trees promotes the creation of gaps in CBASs, which may lead farmers to fill these gaps by introducing fruit trees as citrus in particular, resulting in functional diversity.

Of the 26 producers interviewed, 23% admitted that they did not know the distribution of citrus trees. Even though 77% of them stated that they knew the spatial structure of citrus in their CBAS. There was a mismatch between the structures declared and those adopted. The low coincidence rates calculated between the actual and declared spatial structures testify to the fact that the farmers interviewed do not always make deliberate choices. This is also the case even in terms of the choice of other sub-population structures in the CBAS. It is often accepted that strategies of farmers who retain, maintain, or develop the different types of cocoa-based agroforestry systems are under the farmer's control (Sonwa et al. 2007, 2014; de Souza et al. 2012; Jagoret et al. 2014a). Results obtained in this study show that it is necessary to provide support to producers, particularly in the design of systems and the spatial structure's choice. Not only do a large proportion of them not understand the importance of the individual spatial structure, but those who declare that they know the spatial structures adopted do not always have the exact knowledge. Moreover, spatial structures adopted are those

that favor the dissemination of diseases, particularly on citrus as shown by (Akoutou Mvondo et al. 2019, 2020; Ndo et al. 2019b, 2023), and on other pathosystems (Schroth and Harvey 2007; Gidoïn et al. 2014; Schroth et al. 2000). Otherwise, the dominance of random citrus distribution could also be justified by the fact that the majority of farmers, not having been educated or trained in modern agroforestry techniques, randomly scatter citrus individuals throughout the plantation without following a well-defined program with regular distances to be maintained between individuals.

Farmers explained their choice of the aggregated spatial structure by marking boundaries with neighboring CBAS, uniformity of shade on cocoa trees, or replacing dead trees (cocoa, forest, and other fruit trees). These reasons have often been cited in various studies to discuss the importance of associated tree services in CBAS (Barrios et al. 2018). However, these reasons alone cannot explain the spatial structure of citrus in CBAS. Compositional and biodiversity variables were involved in the adoption of the spatial observed in the studied CBAS. Thus, the number of individuals (cocoa trees, forest trees, other fruit trees) and the biodiversity index in CBAS could explain the spatial structure of citrus in CBAS. The random spatial structure of citrus could be explained by the significantly high density of cocoa trees on the one hand, and the high density of citrus trees on the other. On the other hand, the aggregated structures of citrus could be explained by the clustering of fruit trees of the same species (or genus) at specific locations on the farm. It could also be explained by the introduction of citrus trees at locations in the CBAS where there are few forest trees. Deheuvels et al. (2012) surmised that agroforests appear to mimic the spatial structure of tropical forests but not their plant composition. Our results establish a direct link between the species composition of the plant stand and the spatial structure of citrus trees. Indeed, the quantity and quality of the plant stand can guide or direct the spatial structure adopted for a defined sub-population in the CBAS.

Conclusion

Understanding CBAS structural properties is a research priority at a time when the agroecological

transition is at the forefront of global agricultural issues. Reconciling production quantity and quality on one hand, and optimizing ecosystem services on the other, seems to be a matter of synergistic action between research and farmers. Contributing to the optimization of the spatial structure of citrus trees in CBAS should therefore begin with an upstream understanding of the reasons why farmers adopt existing spatial structures. This is what this study focused on. In this study, it was shown that the spatial structures of citrus trees in CBAS are predominantly random. Aggregate structures are in the minority and regular structures are rare. However, the analysis of the $L(r)$ function revealed a high variability of these spatial structures. This study highlights an inconsistency between the observed spatial structures of citrus trees in CBAS and those declared by the farmers. Endogenous factors, including a number of individuals (quantitative) and species diversity (qualitative) of the plant stand, were found to be the main variables explaining the aggregated and random spatial structures of citrus trees in the CBAS. It thus emerges that the observed spatial structures in the CBAS are more related to the composition of the system itself than to the deliberate action of the farmers. This study thus has a practical application and therefore concludes that the reasons for choosing spatial structures are not immutable. Adequate spatial structures can be proposed and adopted by producers, provided they are well-informed about the benefits of the proposed structures.

Acknowledgements Our gratitude goes to the local populations of Boyambassa (Bokito), Nkolkougda (Evodoula), Bikok, and Maholè (Boumnyebel). We are grateful for their hospitality and warm welcome without which this study would not have been possible.

Author contributions Conceptualization: A.M.E. and N.E.G.D.; Methodology: A.M.E. and N.E.G.D.; Validation: N.E.G.D., A.M.E., B.N.L., B.M., A.Z., and C.C.; Formal analysis and Investigation: A.M.E.; Resources: N.E.G.D., A.M.E., B.N.L., B.M., A.Z., and C.C.; Writing-Original Draft: A.M.E. and N.E.G.D.; Supervision: N.E.G.D. and C.C.; Project administration: N.E.G.D. and C.C.; Funding acquisition: A.M.E.

Funding This research was funded by the International Foundation for Science (IFS) through grant N° I-1-C-6218-1; the DP Agroforesterie Cameroun which also contributed through three financial grants awarded to doctoral students between 2018 and 2020; and the Institute of Agricultural Research for Development (IRAD) also funded this research through the

2019 Public Investment Budget and support granted by the General Management of this Institute.

Availability of data and materials The datasets generated during and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Declarations

Conflict of interest The authors declare that they have no potential conflict of interest about the study in this paper.

Consent to participate Verbal informed consent was obtained before the interview.

Consent for publication The authors affirm that human research participants provided informed consent for publication.

References

- Abada Mbolo MM, Zekeng JC, Mala WA et al (2016) The role of cocoa agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central region of Cameroon. *Agrofor Syst* 90:577–590. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9945-8>
- Akoutou E, Ndo E, Bieng M-A et al (2017) Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and *Phytophthora* foot rot disease of citrus severity. *Agrofor Syst*. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0140-3>
- Akoutou Mvondo E, Ndo EGD, Ngo Bieng M-A et al (2019) Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and *Phytophthora* foot rot disease of citrus severity. *Agrofor Syst* 93:493–502. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0140-3>
- Akoutou Mvondo E, Ndo EGD, Tsouga Manga ML et al (2020) Effects of complex cocoa-based agroforests on citrus tree decline. *Crop Prot* 130:105051. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105051>
- Arimi K, Omoare A (2021) Motivating cocoa farmers to adopt agroforestry practices for mitigating climate change. *Renew Agric Food Syst* 36:599–604. <https://doi.org/10.1017/S1742170521000223>
- Asigbaase M, Sjoergersten S, Lomax BH, Dawoe E (2019) Tree diversity and its ecological importance value in organic and conventional cocoa agroforests in Ghana. *PLOS ONE* 14:e0210557. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210557>
- Babin R, Anikwe JC, Dibog L, Lumaret J-P (2011) Effects of cocoa tree phenology and canopy microclimate on the performance of the mirid bug *Sahlbergella singularis*: Two factors affecting cocoa mirid performance. *Entomol Exp Appl* 141:25–34. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2011.01164.x>
- Barrios E, Valencia V, Jonsson M et al (2018) Contribution of trees to the conservation of biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes. *Int J Biodivers Sci Ecosyst Serv Manag* 14:1–16. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1399167>
- Cerda R, Deheuvels O, Calvache D et al (2014) Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption: looking toward intensification. *Agrofor Syst* 88:957–981. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9691-8>
- de Souza HN, de Graaff J, Pulleman MM (2012) Strategies and economics of farming systems with coffee in the Atlantic Rainforest Biome. *Agrofor Syst* 84:227–242. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9452-x>
- Deheuvels O, Avelino J, Somarrriba E, Malezieux E (2012) Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agric Ecosyst Environ* 149:181–188. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.003>
- Delgado FX, Britton JH, Lobo-Lima ML, et al (1997) Small-scale field trials with entomopathogenic fungi against *Locusta migratoria capito* in Madagascar and *Oedaleus senegalensis* in Cape Verde. In: Krall S, Peveling R, Ba Diallo D (eds) *New Strategies in Locust Control*. Birkhäuser, Basel, pp 171–176
- Eunice Golda Danièle N, Mvondo Etienne A (2021) Integrated Management Approach to Citrus Fungal Diseases by Optimizing Cocoa-Based Agroforests Structural Characteristics. In: Sarwar Khan M, Ahmad Khan I (eds) *Citrus Research, Development and Biotechnology*. IntechOpen
- Fule CB (2014) Small-scale versus large-scale cocoa farming in Cameroon. <https://stud.epsilon.slu.se/6438/>. Accessed 5 Dec 2022
- Gidoin C, Babin R, Bagny Beilhe L, et al (2014) Tree spatial structure, host composition and resource availability influence mirid density or black pod prevalence in cacao agroforests in Cameroon. *PLoS ONE* 9:e109405. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109405>
- Gidoin C (2013a) Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer : la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun. 212
- Gidoin C (2013b) Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer : la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun. 212
- Gockowski J, Tchata M, Dondjang J-P et al (2010) An empirical analysis of the biodiversity and economic returns to cocoa agroforests in Southern Cameroon. *J Sustain for* 29:638–670. <https://doi.org/10.1080/10549811003739486>
- González-Moreno P, Quero JL, Poorter L et al (2011) Is spatial structure the key to promote plant diversity in Mediterranean forest plantations? *Basic Appl Ecol* 12:251–259. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2011.02.012>
- Goreaud F, Pelissier R (2000) Analyse de la structure spatiale de semis de points hétérogènes : exemples d'application à des peuplements forestiers. Report, irstea
- Jagoret P, Michel-Dounias I, Snoeck D et al (2012) Afforestation of savannah with cocoa agroforestry systems: a small-farmer innovation in central Cameroon. *Agrofor Syst* 86:493–504. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9513-9>
- Jagoret P, Kwessey J, Messie C et al (2014a) Farmers' assessment of the use value of agrobiodiversity in

- complex cocoa agroforestry systems in central Cameroon. *Agrofor Syst* 88:983–1000. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9698-1>
- Jagoret P, Kwesessu J, Messie CA, et al (2014c) Valeurs d'usage des ligneux utilisés en agroforesterie : les cacaoyères du Centre-Cameroun. *BOIS For Trop* 321:45. <https://doi.org/10.19182/bft2014.321.a31217>
- Jayne TS, Mather D, Mghenyi E (2010) Principal challenges confronting smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa. *World Dev* 38:1384–1398. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.06.002>
- Kaba JS, Otu-Nyanteh A, Abunyewa AA (2020) The role of shade trees in influencing farmers' adoption of cocoa agroforestry systems: Insight from semi-deciduous rain forest agroecological zone of Ghana. *NJAS Wagening J Life Sci* 92:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100332>
- Kan Z, Kwan M, Tang L (2021) Ripley's K-function for network-constrained flow data. *Geogr Anal Gean*. <https://doi.org/10.1111/gean.12300>
- Kouassi J-L, Kouassi A, Bene Y et al (2021) Exploring barriers to agroforestry adoption by cocoa farmers in South-Western Côte d'Ivoire. *Sustainability* 13:13075. <https://doi.org/10.3390/su132313075>
- Leakey RRB (2017) Definition of agroforestry revisited. *Multi-funct Agric*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805356-0.00001-5>
- Ledo A, Schnitzer SA (2014) Disturbance and clonal reproduction determine liana distribution and maintain liana diversity in a tropical forest. *Ecology* 95:2169–2178. <https://doi.org/10.1890/13-1775.1>
- Manga Essouma F, Michel I, Mala WA et al (2020) Cocoa-based agroforestry system dynamics and trends in the Akongo subregion of central Cameroon. *Agrofor Syst*. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00510-9>
- Mbolo MMA, Zekeng JC, Mala WA et al (2016) The role of cocoa agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central region of Cameroon. *Agrofor Syst* 90:577–590
- Mortimer R, Saj S, David C (2018) Supporting and regulating ecosystem services in cacao agroforestry systems. *Agrofor Syst* 92:1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0113-6>
- Mvondo EA, Danièle Ndo EG, Nomo LB et al (2022) Tree diversity and shade rate in complex cocoa-based agroforests affect citrus foot rot disease. *Basic Appl Ecol*. <https://doi.org/10.1016/j.baee.2022.08.003>
- Ndo EGD, Akoutou ME (2021) Integrated management approach to citrus fungal diseases by optimizing cocoa-based agroforests structural characteristics. *IntechOpen*
- Ndo E, Manga B, Ndoumbe-Nkeng M, Cilas C (2019a) Distribution of *Pseudocercospora* fruit and leaf spot, *Phytophthora* foot rot and scab diseases and their effect on Citrus tree decline prevalence in the humid zones of Cameroon. *Fruits* 74:249–256. <https://doi.org/10.17660/th2019/74.5.5>
- Ndo EGD, Kuate J, Sidjeu Wonfa CS et al (2019b) Tolerance of citrus genotypes towards *Pseudocercospora* leaf and fruit spot disease in western highlands zone of Cameroon. *Crop Prot* 124:104828. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.022>
- Ndo EGD, Akoutou Mvondo E, Bella Manga F et al (2023) Spatial distribution of citrus pseudocercospora leaf and fruit spot disease and shade effect on disease intensity. *Crops* 3:11–23. <https://doi.org/10.3390/crops3010002>
- Ndo EGD (2011) Evaluation des facteurs de risque épidémiologique de la Phaeoramulariose des agrumes dans les zones humides du Cameroun. Thesis, UM2
- Ngo Bieng MA, Gidoïn C, Avelino J et al (2013) Diversity and spatial clustering of shade trees affect cacao yield and pathogen pressure in Costa Rican agroforests. *Basic Appl Ecol* 14:329–336. <https://doi.org/10.1016/j.baee.2013.03.003>
- Schroth G, Harvey CA (2007) Biodiversity conservation in cocoa production landscapes: an overview. *Biodivers Conserv* 16:2237–2244. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9195-1>
- Schroth G, Krauss U, Gasparotto L et al (2000) Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agrofor Syst* 43:199–241
- Somarriva E, Suárez-Islas A, Calero-Borge W et al (2014) Cocoa–timber agroforestry systems: *Theobroma cacao*–*Cordia alliodora* in Central America. *Agrofor Syst* 88:1001–1019. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9692-7>
- Sonwa DJ, Nkongmeneck BA, Weise SF et al (2007) Diversity of plants in cocoa agroforests in the humid forest zone of Southern Cameroon. *Biodivers Conserv* 16:2385–2400. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9187-1>
- Sonwa DJ, Weise SF, Schroth G et al (2014) Plant diversity management in cocoa agroforestry systems in West and Central Africa—effects of markets and household needs. *Agrofor Syst* 88:1021–1034. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9714-5>
- Temple L (2001) Quantification des productions et des échanges de fruits et légumes au Cameroun. *Cah Agric* 10:87–94

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.



RESEARCH PAPER

Tree diversity and shade rate in complex cocoa-based agroforests affect citrus foot rot disease

Etienne Akoutou Mvondo^{a,b,*}, Eunice Golda Danièle Ndo^a,
Lucien Bidzanga Nomo^a, Zachée Ambang^b, Faustin Bella Manga^a, Christian Cilas^c

^aInstitute of Agricultural Research for development (IRAD), P.O. Box 2123, Yaoundé, Cameroon

^bDepartment of Plant Biology and Physiology, Faculty of Science, University of Yaounde I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon

^cCIRAD, UPR Bioagresseurs, 34398 Montpellier, France

Received 2 September 2021; accepted 7 August 2022

Available online 9 August 2022

Abstract

The role of agroforest systems in pathogen regulation through structural characteristics such as shade and tree diversity is recognized. However, few studies have examined the importance of these factors on the spread of diseases of associated fruit trees in agroforestry systems, especially cocoa-based agroforestry systems (CBAS). The aim of this study was to evaluate the effect of associated tree diversity and shade rate into CBAS on citrus *Phytophthora* foot rot disease (PFRD) intensity. The study was carried out in five citrus production basins of Cameroon, contrasted by ecology and rainfall regimes. A set of 33 CBAS plots was mapped and their species composition and vertical structure were determined. Field data were used to reconstruct CBAS in 3D with Shademotion 5.1.47 software. Using static simulations with shadow overlays, shade rate received by each citrus tree was calculated. Subsequently, citrus trees were grouped into three categories according to the shade rate they received: (i) full sun, with shade rate <30%; (ii) light shade with shade rate 30–70% and, (iii) dense shade, with shade rate >70%. PFRD intensity was determined by measuring the canker extent relatively to the citrus crown circumference. A significant difference in PFRD intensity was observed between the different shade rates. Citrus trees receiving no shade were significantly more attacked by PFRD than those receiving little shade or dense shade. The antagonistic effect of shade was demonstrated. At the expense of factors related to the specific composition of the CBAS, shade, temperature, relative humidity and rainfall were found to be the main factors explaining PFRD intensity in CBAS. This study shows that microclimatic alterations due to the biodiversity in tropical agroforestry systems contribute to sustainable pest management.

© 2022 The Authors. Published by Elsevier GmbH on behalf of Gesellschaft für Ökologie. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Keywords: Agroforestry; Biodiversity; Phytophthora; Citrus, and integrated disease management

Introduction

Conventional agriculture has allowed for the tremendous increase in agricultural production since the 1950s, contributing to the relative reduction of hunger and poverty globally (Pingali, 2012). However, the resulting heavy

*Corresponding author at: Institute of Agricultural Research for development (IRAD), P.O. Box 2123, Yaoundé, Cameroon.

E-mail address: etienneakoutou@gmail.com (E. Akoutou Mvondo).

ecological toll discredits this model of agriculture and makes it unsustainable (Jepson et al., 2014; Sharma et al., 2019). The chemical plant protection products extensively used in conventional agriculture have drastic effects on non-target species and affect animal and plant biodiversity, as well as aquatic and terrestrial food webs (Tudi et al., 2021). The use of chemical plant protection products is thus of increasing concern for both agriculture itself and the environment as well as human and animal health (Warra & Prasad, 2020). Improving agricultural production systems toward new models of sustainable, resilient, and environmentally-friendly agriculture is becoming an urgent need (Dornbush & von Haden, 2017).

The agroecological strategy of relying on ecological processes of interest, within agroecosystems, to maximize productivity and sustainability, while reducing the use of chemical inputs is gaining acceptance. Agroecosystems thus represent a preferred pathway to resilient and future agricultural systems (Bennett et al., 2021). Indeed, inspired by natural ecosystems, which are the result of an adaptation of animal and plant communities in a given environment, and thus to specific biotic and abiotic constraints, these systems provide a model for sustainability and resilience (Ngo Bieng et al., 2013). Among these characteristics of natural ecosystems, species diversity is assumed to play a key role in the sustainability and multifunctionality of agroforestry systems. Thus, an increase in plant diversity in agroecosystems is assumed to improve the provision of many ecosystem services, including pest regulation (Schreefel et al., 2020).

Agroforestry is a dynamic and ecological resource management system that, through the integration of trees into agricultural and rangelands, diversifies and sustains smallholder production for increased socio-economic and environmental benefits. In recent decades, various studies have described and characterized the structure of cocoa-based agroforestry systems (CBAS) (Akoutou Mvondo et al., 2020; Gidoïn et al., 2014). In the Cameroonian rainforest areas, citrus trees are mainly produced in CBAS (Akoutou Mvondo et al., 2019; Ndo, 2011). Although various citrus species/varieties are grown in Cameroon, the main species found are *C. sinensis*, *C. reticulata*, *C. paradisi*, *C. maxima* and *C. limon* (Fig. 1A).

In agroforestry, the term shading is related to the microclimatic alterations that occur in the understory due to the presence of an upper vegetation canopy in the agroforestry system. The presence of trees associated with a crop buffers air and soil temperature, decreases wind speed and the quantity and quality of transmitted light; and increases relative air humidity and soil moisture in the understory (Tscharrntke et al., 2011). The effect of shading on pests is controversial (Schroth et al., 2000). While dense shade favours the spread of some pathogens, light shade or no shade may limit the development of other pathogens (Akoutou Mvondo et al., 2019). Several studies have shown the implication of shading on the development and spread of various pathogens (Durand-Bessart et al., 2020). The effects of shade have

been documented; and light, especially ultraviolet light has been shown to stimulate sporulation of many fungal species. In addition, microclimate can indirectly influence pathogen through its impact on the host plants (Pumariño et al., 2015).

Phytophthora are important soil and waterborne pathogens responsible for significant damage in agricultural and natural ecosystems. The genus *Phytophthora* represents a significant and emerging biosecurity threat worldwide (Puglisi et al., 2017). To nowadays, about 182 *Phytophthora* species have been formally described, with an estimated total of 326 species covering 12 phylogenetic clades (Bose et al., 2021). Of these *Phytophthora* species, about 13 infest citrus (Asim et al., 2019). *P. nicotiana* (Syn. *P. parasitica*), *P. palmivora* and *P. citrophthora* are the most damaging species worldwide and are therefore the most economically important (Gade & Lad, 2019). *Phytophthora* foot rot disease (PFRD) is thus a major constraint and a global concern for the citrus industry (Ramallo et al., 2019; Chaudhary et al., 2020). *Phytophthora* losses on citrus result from seedling dieback in the germplasm, root and crown rots in the nursery and in field. Foliage dieback resulting from root rot precipitates tree death and limits orchard life span. Pre- and post-harvest fruit rots also result in huge production losses (Graham & Feichtenberger, 2015). Among these symptoms, citrus *Phytophthora* foot rot disease (PFRD) is the most severe, and causing the most damage in the major citrus producing areas, as well as in Cameroon (Fig. 1B and C) (Akoutou Mvondo et al., 2019, 2020).

PFRD managing requires a complex and costly set of strategies (Gade & Lad, 2019). Of all these methods, the chemical control approach is the most widely used in the major citrus growing areas (Sawake et al., 2022). In Cameroon, however, most citrus production is provided by smallholders, for whom these methods are not feasible and too expensive. Production systems have remained traditional, and cultural practices empirical (Ndo, 2011). Citrus varieties used are not always tolerant to PFRD, and plots were established with ungrafted seedlings. In addition, ever-increasing concerns about environmental and soil health are driving the search for more environmentally friendly means of disease control (Panth et al., 2020). Thus, there is an urgent need to develop targeted PFRD management strategies tailored to local production systems and context. This paper aims to evaluate the effect of floristic diversity in CBAS and the resulting shade rate on PFRD intensity. The basic hypothesis is that microclimatic alterations in CBAS contribute to reducing the intensity of PFRD.

Materials and methods

Study area and citrus production basins

Five citrus production basins (CPB) were selected from four different ecologies:

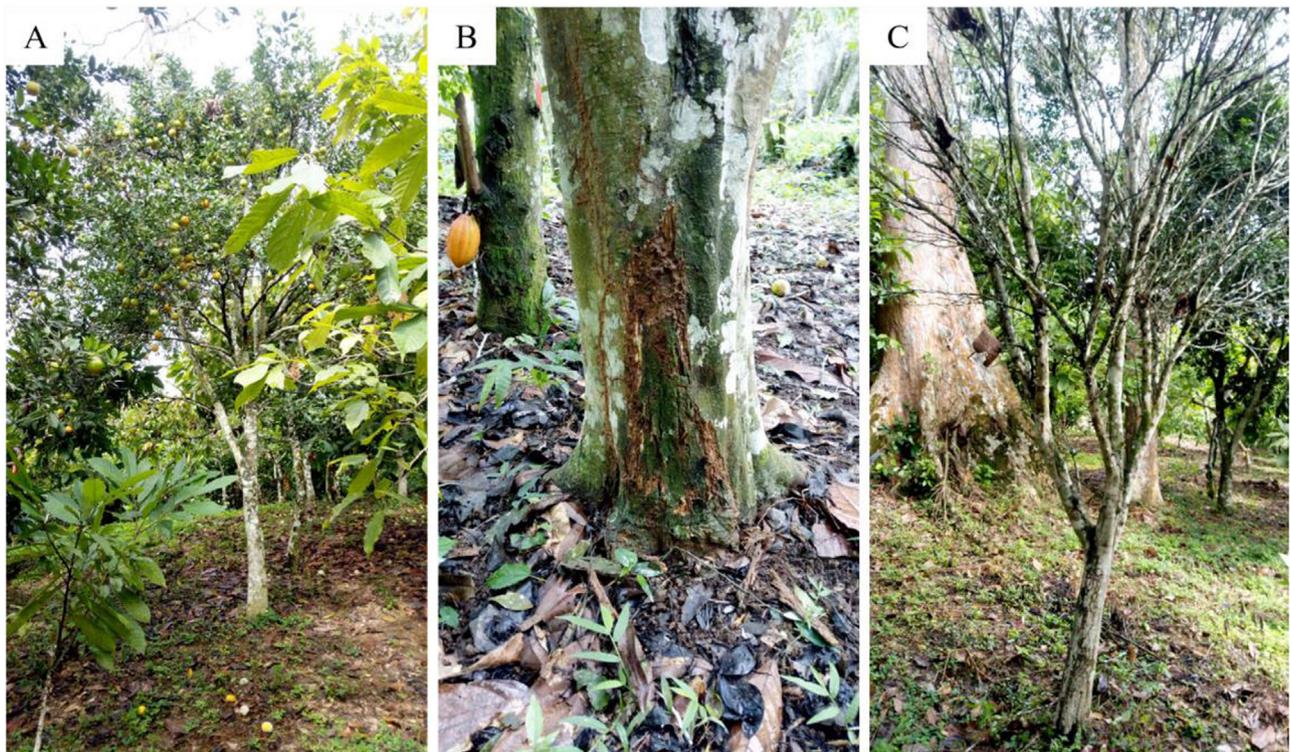


Fig. 1. Illustration of (A) an orange tree (*Citrus sinensis*) planted in a complex cocoa-based agroforest; (B) an orange tree attacked by *Phytophthora* foot rot disease; (C) and a mandarin tree (*C. reticulata*) completely declined following a severe attack of the *Phytophthora* foot rot disease.

- Bokito CPB (Latitude: 4° 33' 59.99" N; Longitude: 11° 06' 60.00" E), located in the forest-savanna transition zone. The climate is hot and humid, with average annual temperature of 25.5 °C, average rainfall of 831.7 mm with a bimodal pattern, and an average relative humidity of 75%. CBAS are usually established in previous cropping areas (Jagoret et al., 2012b, 2018). Given the scarcity of native forest trees, fruit trees are abundantly introduced to provide shade for cocoa trees and are considered as valuable source of income.
- Evodoula CPB (latitude: 011°14'592 "E; longitude: 04°06'226 "N), located in the degraded forest zone. The climate is hot and humid, temperatures around 23.0 °C, average rainfall of 1727 mm with a bimodal pattern, and an average relative humidity of 85%. This site is located in the Lekie Sub-division which is currently the largest cocoa-producing area in Cameroon. Cocoa is produced in complex and highly biodiverse CBAS. Fruit trees, including citrus, are an essential component of these CBAS;
- Bikok (Latitude: 3° 38' 31.31 "N; Longitude: 11° 31' 54.88 "E) and Boumnyebel (Latitude: 3° 52' 59.5" N; Longitude: 10° 51' 00.8" E) CPBs are located in the dense forest zone. The climate is hot and humid, temperatures around 25.7 °C, average rainfall of 1800 mm with a bimodal pattern, and an average relative humidity of 84%. These two CPBs are different from each other, particularly in terms of the crops grown by the local populations. In Bikok, cocoa farming is practiced in complex and highly biodiverse CBAS, whereas in the Boumnyebel, farmers practice oil palm production in addition to cocoa farming. Thus, in the latter CPB, it is very common to find palm trees associated not only with cocoa trees, but also with fruit trees such as citrus;
- Muyuka CPB (Latitude: 4° 17' 23.28" N; Longitude: 9° 24' 37.08" E), located in the humid forest zone with monomodal rainfall. It is a very humid and hot dense forest area, with average annual temperatures

ranging from 22 to 29 °C and relative humidity of 85 to 95%. The average annual rainfall varies from 2500 to 4000 mm and even 11,000 mm in some localities. It is characterized by a 3-month dry season (December to February) and a 9-month rainy season (March to November). Muyuka represents one of the largest cocoa production basins in Cameroon (Mukete et al., 2018). Here, cocoa production is intensive and farms are managed in such a way as to optimize cocoa production. This is done in particular by reducing the number of associated trees. It has been shown that in this locality CBAS tend to be bi-specific, associating cocoa and fruit trees, generally citrus (Akoutou Mvondo et al., 2019).

Across all of the CPBs, 33 plots were established including eight in Bokito, seven each in Bikok and Evodoula, six in Muyuka, and five in Boumnyebel. Each CPB represents a geographical area with fairly homogeneous climatic and edaphic conditions and can therefore guarantee homogeneous citrus production. Within each CPB, study plots were at least 3 km apart. In each CPB, CBAS plots with (i) at least 12 citrus trees (including all citrus species) on a surface of 2500 m², (ii) diverse forest trees and (iii) fruit trees other than citrus, were selected.

Mapping of CBAS and tree characterization

CBAS mapping essentially consisted of taking the x and y coordinates of perennial plants present in the sample area in order to reconstruct CBAS and quantify shade rate. Mapping

was done using a Leica TCR 703 Total Station, according to the method used by Gidoïn (2013)) and Ngo Bieng et al. (2013). To map a CBAS, the highest point of the plot, or failing that, the point in the plot from which a maximum number of individuals (plants) could be observed, was sought. Once targeted, a first station (S1) was set up by levelling the Total Station. Subsequently, a first target point (P1) was targeted at 50 m (or slightly more). The GPS coordinates of S1 and P1 (Longitude, Latitude and Altitude) were noted as well as the triangular coordinates of P1 Hz (which represents the angle of inclination with respect to the baseline, here 0) and D the horizontal distance between S1 and P1. The mapping is carried out in prism mode (infrared measurement) to avoid reflection phenomena of the laser mode. Prism mode requires the prism, carried by a 1.30 m pole, to be moved from tree to tree to record their position. The Total Station measures the distance D from the station point S to the target point (tree). Subsequently, one person fixed at point S1 takes the measurements with the Total Station and the other moves the prism from tree to tree.

Subsequently, all perennial plants with a DBH ≥ 10 cm in the experimental plot were sampled and characterized as defined by Akoutou Mvondo et al. (2019). Trees were classified into five groups, or “sub-populations”: (i) cocoa trees, (ii) forest trees, (iii) other fruit trees, (iv) citrus trees, and (v) palms or coconut trees. For each individual the family and species names were recorded. Tree characterization consisted of taking measurements. This consisted of measuring the DBH at 1.30 m from the ground, the height of the stem, the length and the width of the canopy for all trees using a measuring tape. For the large forest trees, the measurement of their height was done using a clinometer. Thus, the shape of each individual tree’s canopy (ellipsoidal, semi-ellipsoidal, cylindrical, conical) was determined. Foliage density was scored by two observers and then averaged. The density of the foliage (or its opacity) was quantified using a scale from 0 to 100 as stated by (Somarriba, et al., 2021). At 0, 100% of the light passing through the tree’s foliage reached the ground, while at 100, 0% of the light passing through the foliage reached the ground).

3D reconstruction of CBAS and shade quantification

The concept of shade rate used in this paper refers to the number of hours of shading received by a point on the sampled surface, calculated during the simulation period. This shade rate was calculated for each citrus tree in the CBAS using the ShadeMotion 5.1.4.2 software. The cartographic data obtained in the field were used to reconstruct the CBAS in 3D in ShadeMotion. For each tree, data used were: X and Y coordinates, stem height, canopy height and width and foliage density. In the simulation, the monthly foliage density variation of tree species during the seasons of the year

(deciduous tree) was taken into account. Indeed, some species widely present in CBAS such as *Ceiba pentandra* are deciduous. Subsequently, the static simulation mode was used with shadow overlays to quantify the shade rate received by each citrus tree, and for each plot. This mode does not take into account tree growth, i.e., crown and trunk dimensions remain constant and it is not possible to plant or remove trees during the simulation. In static mode, the simulation runs continuously from start to finish. Indeed, ShadeMotion allows to count the hours of shade stored at each “point” (cell) of a plot with trees during a specific period. During simulation, hours (moments) are the basic units of time for simulation (Somarriba et al., 2021). The amount of shade received by the citrus trees was calculated for 1 year (between 01 January 2020 and 31 December 2020). The frequency of solar movement was set every hour with 10 h of sunlight per day (07:00 to 17:00). As the study was conducted in the tropics and close to the equator, we assumed equal sunshine duration for all days of the year. In addition, the topographical slope angle was not taken into account as most of the plots studied were located on relatively flat land. The Eq. (1) measures the total moments which allows to calculate the total number of moments of a simulation

$$Mt = NJS * NMj \quad (1)$$

Mt = Total moments; NJS = “number of days in the simulation; NMJ = the number of moments per day”.

The population density which expresses the number of trees per unit area in the plot was calculated. This variable is expressed as trees per hectare (trees/ha). In order to account only for the shade cast on the ground by the shade trees, citrus and cocoa trees were excluded from the simulation. The percentage of shade received by each citrus tree or the shade rate was obtained from the location of the tree on the shade map obtained after simulation.

Once the shade rate received by each citrus was calculated, they were grouped into three categories: full sun, with shade rate <30%; (ii) light shade with shade rate 30–70% and, (iii) dense shade, with shade rate >70%. Due to the fact that the simulation was done in the “overlap” mode of shading, the shade rate received by the citrus trees could, in fact, go beyond 100%. As CBAS are complex and biodiverse, all shade rate possibilities were relatively common in all plots and CPB.

Quantification of shade tree biodiversity and basal area measurement

The Shannon diversity index was calculated to determine the diversity of shade trees. This index was used to quantify the heterogeneity of shade tree species. Basal area is a very common concept in forestry. It depends on both the size and number of trees, provides valuable information on the density of a stand and is related to standing volume (Poeydebat

et al., 2021). Therefore, we calculated the basal area (G) of shade trees per experimental unit using equation (4). In this equation, the D -value represents the DBH obtained for each shade tree. To calculate the land area for the experimental plots, the diameters of citrus and cocoa trees were excluded.

$$G = \pi(D)^2/2 \quad (2)$$

PFRD quantification in fields

On each citrus tree present in the plot, lesions on the crown (possibly with gum flow) were looked for. When present, the extent of these lesions (L_{Ext}) was measured as well as the circumference of the tree foot (C), using a measuring tape. These two values were used to calculate the rate of citrus foot attacked by PFRD (I_{PFRD}) using Eq. (5).

$$I_{PFRD} = \left(\frac{L_{Ext}}{C} \right) \times 100 \quad (5)$$

The data were taken during two observation sessions, the first between December 2019 and February 2020 and the second between June and August 2020. For each CPB, the average data for the two observation sessions were calculated.

Climatic data acquisition

Climatic data including temperature, relative humidity and rainfall for each location were obtained from the National Meteorological Department for the period 2010 to 2020. For each site, averages were calculated.

Data analysis

For data analysis, after verification of their normality, the Anova at $P = 0.05$, of the PFRD intensity for the three levels

of shading (dense shade, light shade, and no shade) previously defined were done for each CPB. Where significant differences were observed, comparison of means was conducted using t -test. These analyses were performed using the R 4.1.1 software.

To analyze the effect of climate and system variables on PFRD intensity, we performed generalized linear mixed effects models (GLMM), with a Poisson error structure, using the `glmer` function in the `lme4` package of R 4.1.1 (*The R Project for Statistical Computing, 2022*). For variables related to CBAS structure, multicollinearity was assessed by computing a variance inflation score (VIF), using the “`car`” package. The number of species, number of associated trees and biodiversity index (H') had a $VIF > 3$, these variables were not considered in the GLMM analysis. The fixed model included three variables: site (5 modalities), number of individuals in the plot (three modalities) and basal area (three modalities), as well as the interaction between these variables. The random model included shading rate.

Results

Shade trees species in CBAS and biodiversity in the CPBs

There is a high variability of shade trees in CBAS studied in terms of quality and quantity. Table 1 shows the distribution of different tree subpopulations constituting the CBAS studied, the Shannon index (H') and basal area (G). For the citrus subpopulation, there was a significant difference between CPBs. The lowest number of citrus trees was observed in Evodoula while the highest average number of citrus trees was found in Bokito. For forest trees, anova also showed significant differences between CPB. Bokito, Boumnyebel and Muyuka CPBs showed the lowest tree abundance per hectare. For other fruit trees, there is also a significant difference between CPB. Bokito and Muyuka are CPBs with the lowest abundance of other fruit.

Table 1. CBAS tree sub-population, Shannon index (H'), basal area (G) and shade rate ($mean \pm SE$).

Citrus production basins	Citrus	Cocoa	Forest tree	Fruit tree	Palmtree	H'	G (m ² /ha)	Shade rate (%)
Bikok	72.0 ± 20.9 ^a	832.0 ± 107.4 ^{ab}	103.4 ± 46.0b	89.7 ± 52.6 ^b	25.3 ± 34.9 ^a	2.4 ± 0.5 ^b	188.8 ± 74.6 ^{ab}	73.7 ± 37.2 ^d
Bokito	137.5 ± 75.8 ^b	768.0 ± 102.5 ^{ab}	32.0 ± 18.4a	16.5 ± 9.1 ^a	8.6 ± 7.7 ^a	1.6 ± 0.3 ^a	450.5 ± 363.4 ^b	51.9 ± 27.4 ^c
Boumnyebel.	72.8 ± 16.3 ^{ab}	639.2 ± 196.9 ^a	51.2 ± 20.3a	87.2 ± 34.1 ^b	25.6 ± 13.7 ^a	2.4 ± 0.5 ^b	167.3 ± 46.0 ^{ab}	70.1 ± 31.6 ^d
Evodoula	58.2 ± 6.0 ^a	992.5 ± 175.3 ^b	66.2 ± 23.6 ^{ab}	50.2 ± 10.5 ^{ab}	10.2 ± 6.0 ^a	1.7 ± 0.3 ^a	154.4 ± 89.2 ^a	38.0 ± 38.3 ^b
Muyuka	86.6 ± 34.5 ^{ab}	819.3 ± 249.4 ^{ab}	24.6 ± 15.1a	18.6 ± 10.3 ^a	7.0 ± 6.0 ^a	1.2 ± 0.4 ^a	95.5 ± 109.2 ^a	16.5 ± 10.9 ^a
Anova/ t -test								
Df	4	4	4	4	4	4	4	4
F value	4.01	3.48	8.92	9.97	1.42	8.61	3.703	85.16
Pr(>F)	0.0108	0.0199	<0.0001	<0.0001	0.259	<0.0001	0.0153	<2e-16

Table 2. Citrus *Phytophthora* foot rot disease intensity by citrus production basin and shade rate.

Citrus production basin	PFRD intensity (mean±SE)			Anova/Tukey test		
	Dense shade	Light shade	No shade	Df	F value	Pr(>F)
Bikok	25.55 ± 3.70 ^a	30.20 ± 15.30 ^b	38.50 ± 10.01 ^c	2	13.64	<0.0001
Bokito	32.02 ± 18.10 ^a	35.35 ± 20.23 ^{ab}	39.58 ± 20.68 ^b	2	3.083	<0.05
Boumnyebel	37.30 ± 23.27 ^a	47.61 ± 31.52 ^{ab}	71.42 ± 36.59 ^b	2	5.800	<0.001
Evodoula	33.92 ± 19.50 ^a	54.31 ± 21.20 ^b	55.88 ± 23.86 ^b	2	9.603	<0.0001
Muyuka	32.14 ± 18.89 ^a	40.32 ± 25.74 ^a	72.78 ± 26.34 ^b	2	20.93	<0.0001

There is a highly significant difference between CPB with respect to Shannon diversity index value. CPBs of Bikok and Boumnyebel are the most biodiverse. Similarly for basal area, there is a highly significant difference between CPBs. The Bokito site shows the highest G value (Table 1).

Top 10 most represented shade trees in cocoa-based agroforestry systems

Table 2 shows the top 10 shade tree species in CBAS. *Dacryodes edulis* is the most frequent species and alone represents more than 22% of shade trees in CBAS. In addition, four other fruit tree species are listed in this ranking. These are *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Spondias dulci* and *Annona muricata*. Apart from fruit tree species, four forest tree species are listed in the top 10 of shade tree species in CBAS. These are *Ceiba pentandra*, *Glyricidia sepium*, *Terminalia*

superba and *Spathodea campanulata*. *Elaeis guineensis* also occupies an important place in the top 10 of shade tree species in CBAS. In short, these top 10 species alone represent more than 60% of the shade trees recorded in the CBAS.

CBAS modeling

The CBAS studied were reconstructed in 3D after shading modeling. Fig. 2 below shows comparatively two modeled CBAS and their cumulative shade rate distribution maps. Fig. 2A and D show a cross-section of the CBAS, highlighting the vertical structure of the plots and allowing the stratification of the system to be appreciated. Fig. 2B and E show the aerial view of the two plots, allowing a comparative appreciation of the complexity of the CBAS in relation to its diversification. Fig. 2C and F show the distribution of trees in 2D, represented by points in the two plots.

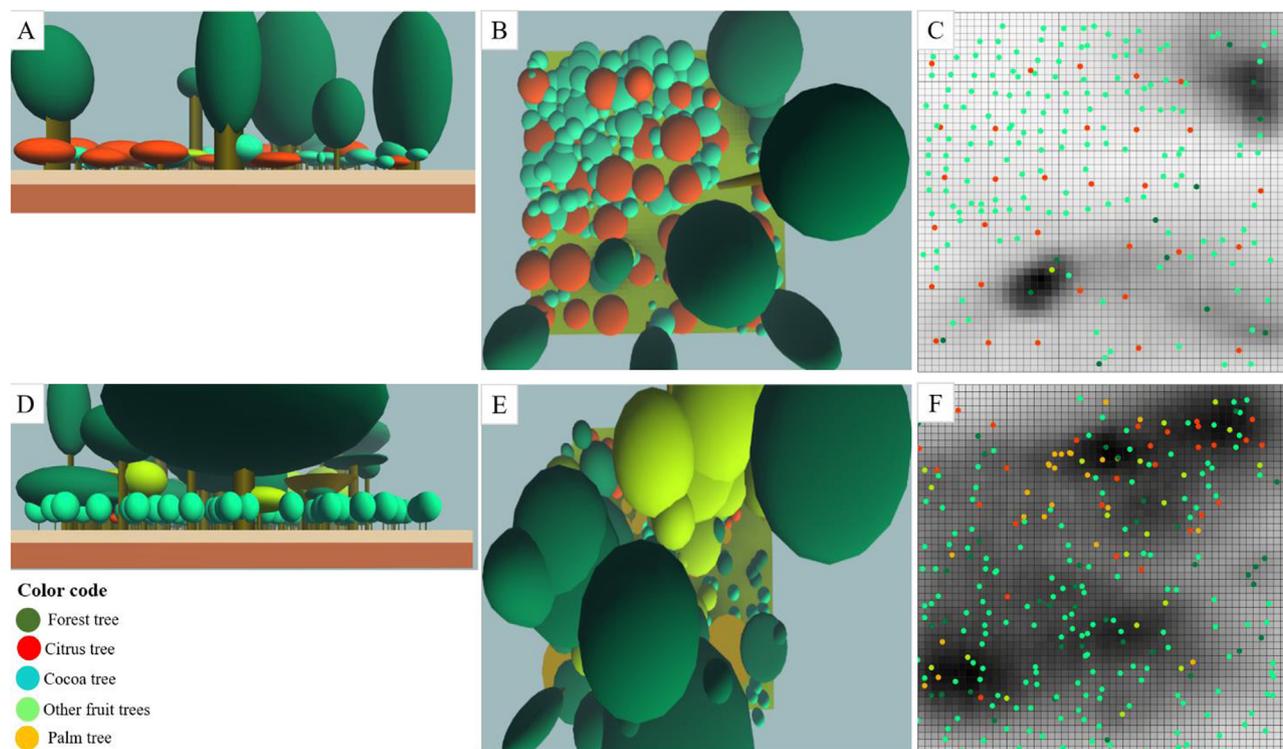


Fig. 2. Illustration of two CBAS, one low diversity (A and B) with a relatively light shade map (C); and the other high diversity (D and E); with a very dark shade map.

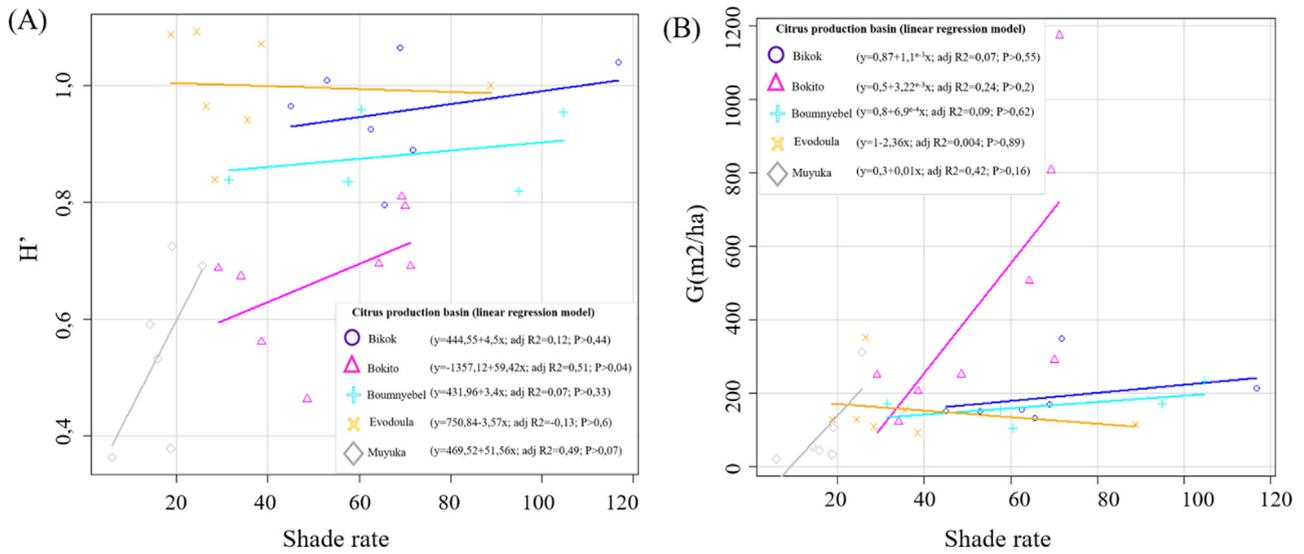


Fig. 3. Relationship between shading rate and biodiversity in CBAS.

Shade rate variation in CBAS

The simulation conducted in the different CBAS allowed the quantification of the cumulative shading rate for one year. The average shading rate in the CBAS ranged from 17 to 74%. Anova showed a highly significant difference ($P = 0.001$) between sites. Bikok had the highest shading rate (Table 2). Biodiversity in CBAS was positively correlated with shading rate. The higher the Shannon index, the higher the shading rate (Fig. 3A). Results show a positive correlation between the number of associated trees and shade rate. The higher the basal area, the higher the shading rate (Fig. 3B).

Effect of shade rate on PFRD intensity

The effect of shade level on PFRD intensity was analyzed at all five sites. ANOVA compared PFRD intensity on citrus trees located in dense shade, light shade and full sun at each site. At the Bikok, Evodoula and Muyuka sites, highly significant differences ($P = 0.001$) in PFRD intensity were observed between shade levels. In Boumnyebel and Bokito, significant differences were observed ($P = 0.01$ and $P = 0.05$) respectively. For the five study sites, citrus trees growing in dense shade were less affected by PFRD than those growing in full sun (Table 3).

Table 3. Results of a generalized linear mixed effects model (GLMM) testing the effect of citrus production basins (CPB), number of individuals (NI) and basal area (G) on PFRD intensity with shade rate as a random effect.

Variables	Estimate	SE	z	Pr (> z)
Intercept	2.204e ⁺⁰⁰	2.048e ⁺⁰⁰	1.076	0.2818
CPB				
Bokito	2.942e ⁺⁰⁰	2.034e ⁺⁰⁰	1.447	0.1480
Boumnyebel	4.159e ⁺⁰⁰	2.018e ⁺⁰⁰	2.061	0.0393
Evodoula	2.465e ⁺⁰⁰	2.027e ⁺⁰⁰	1.216	0.2238
Muyuka	1.876e ⁺⁰⁰	1.970e ⁺⁰⁰	0.952	0.3409
NI	2.848e ⁻⁰³	6.633e ⁻⁰³	0.429	0.6677
G	-3.910e ⁻⁰³	2.521e ⁻⁰³	-1.551	0.1209
CPB x NI				
Bokito x NI	-9.430e ⁻⁰³	7.029e ⁻⁰³	-1.341	0.1798
Boumnyebel x NI	-1.317e ⁻⁰²	6.739e ⁻⁰³	-1.954	0.0507
Evodoula x NI	-5.655e ⁻⁰³	6.758e ⁻⁰³	-0.837	0.4027
Muyuka x NI	-2.774e ⁻⁰³	6.628e ⁻⁰³	-0.419	0.6755
CPB x G				
Bokito x G	-1.220e ⁻⁰³	1.311e ⁻⁰³	-0.931	0.3520
Boumnyebel x G	-2.694e ⁻⁰³	2.256e ⁻⁰³	-1.194	0.2324
Evodoula x G	-1.008e ⁻⁰³	1.520e ⁻⁰³	-0.663	0.5072
Muyuka x G	-3.098e ⁻⁰⁴	1.502e ⁻⁰³	-0.206	0.8366
NI x G (m ² /ha)				
Muyuka x G	1.943e ⁻⁰⁵	8.364e ⁻⁰⁶	2.323	0.0202

Antagonistic effect of shading rate and PFRD intensity

At the site level, the antagonistic effect of shading rate on PFRD intensity in each plot was observed. The higher the shade level, especially in Bikok, Boumnyebel and Bokito, the lower PFRD intensity. Between sites, there was a significant effect of PFRD intensity, especially in Boumnyebel ($z = 2.06$; $p < 0.01$). No significant effect of PFRD intensity was detected for the number of individuals in the plot and basal area. Detected. However, it is the interaction between these two variables that shows a significant effect ($z = 2.323$; $p < 0.01$) (Table 4). When the number of individuals in the plot increases, which would also lead to an increase in basal area, PFRD intensity decreases.

Discussion

Typology and diversity of associated trees in the CBAS

CBAS are considered to be closest to natural ecosystems in terms of function and structure (Schroth & Harvey, 2007). In this paper, the main trees that provide shade to understory crops in CBAS in the humid forest zones of Cameroon, were characterized. Results showed that, of the 10 main shade trees identified, four were forest tree species. These species are among those commonly found in CBAS in Cameroon (Saj et al., 2017). These shade trees are also common in CBAS in other African countries such as Ghana (Abdulai et al., 2018), Nigeria (Oke et al., 2020), as well as the Ivory Coast (Gyau et al., 2015). The second group of shade trees is fruit trees. Five species from this group are present in the top 10 shade species in the CBAS surveyed. These species have a very high occurrence and are counted among the most representative associated trees of the CBAS in Cameroon (Mbolo et al., 2016). In addition to forest and fruit trees, *Elaeis guineensis* or coconut trees are also an important group for providing shade in CBAS (Sonwa et al., 2014).

Shade rate in CBAS varied considerably between plots and study sites. The Muyuka site showed the lowest shade rate compared to the other four sites. In this area, CBAS are most often simplified to low-biodiversity farms composed primarily of cocoa and fruit trees (Akoutou Mvondo et al., 2019). This simplification of CBAS could also be explained by the fact that, in this area, the very high humidity favors brown rot of cocoa pods, which leads farmers to simplify their operations by reducing the number of shade trees. This leads to a significant reduction in the intensity of shade in quantity and quality. CBAS with a sometimes very high number of shade trees and an equally high shade rate were found in the Evodoula, Bikok and Boumnyebel sites. The high shade rate observed in CBAS at these sites is directly

correlated with the high shade tree densities observed, as demonstrated by Nesper et al. (2017) and Tscharncke et al. (2011). CBAS with a low number of shade trees and a high shade rate are characteristic of the Bokito site, which is located in the forest-savanna transition zone. The discrepancy between the number of associated trees and shade rate in Bokito can be explained by the fact that in this zone, CBAS are generally created in savannah (Nijmeijer et al., 2019; Ruf & Schroth, 2015). The provision of shade in these areas is therefore an imperative for producers, and this implies a fairly judicious choice of shade trees. Shade trees found in these areas should therefore be trees with dense and extensive foliage, capable of providing significantly sufficient shade, even at low density.

Antagonistic effect of shade on PFRD intensity

Findings of this study showed that PFRD intensity varies considerably between plots and CPBs, depending on the shade rate in the CPBs. In fact, for most plots, especially those with high shade rate, the intensity of the PFRD was low. Furthermore, applying this to the scale of the CPBs, it can be seen that, the higher the shade rate, the lower the PFRD intensity. Thus, there is a direct antagonistic effect of shade rate on PFRD. In this case, the pest is directly influenced by the degree of shade, depending on its ecological niche. This is evidence that the shade rate has an effect on PFRD intensity. Several studies have highlighted the involvement of shade trees on the regulation of various citrus pests (Akoutou Mvondo et al., 2019; Andres et al., 2018). This is because shading affects the temperature and humidity in the understory, which in turn affects the suitability of the environment for local flora and fauna (Shukla et al., 2009). Indeed, the difference in temperature between full sun and canopy cropping systems can be around 6 °C (Souza et al., 2012). Furthermore, temperature and soil moisture often has an inverse relationship, soil moisture decreases as temperature increases (Lakshmi et al., 2003; Rao et al., 2020). However, it is recognized that fungi tend to grow best at temperatures between 25 and 30 °C (Pietikäinen et al., 2005). For *Phytophthora* spp., temperature is known to affect mycelial growth, sporulation and disease development (Granke & Hausbeck, 2010; Shelley et al., 2018). In this context, the low PFRD intensity on citrus under dense shade, as opposed to those in full sun, may be explained by the fact that many *Phytophthora* species having their optimal growth temperature above 30 °C (Meena et al., 2011), would preferentially infest citrus located in these microclimatic conditions.

In general, *Phytophthora* are parasitic, but are otherwise uncompetitive saprophytes in the soil (Graham & Feichtenberger, 2015). Under favorable conditions, and depending on the season, they grow well on nutrients obtained from the living plant and go through repeated cycles of mycelium to sporangia, zoospores and mycelium again. (Gyeltshen et al.,

2021; Kaur et al., 2021). High humidity and soil temperature > 10 °C are favorable environmental conditions for many *Phytophthora* species (Ristaino, 2012). This could lead one to believe that since dense shade allows for these conditions, CPBs with high shade would be more affected by PFRD. Indeed, although wetter and warmer environmental conditions favor inoculum multiplication, it is under dry and high temperature conditions that disease symptoms are visible (Choudhari et al., 2018). In other words, environmental conditions that are not very mild favor the appearance of symptoms and therefore the development of the disease, while cooler environmental conditions would favor the development of the inoculum and not the expression of the disease itself.

As a result of their biodiversity and resulting structural characteristics, CBAS influence pathosystems in different ways. They can indeed favor or disfavor the survival or flourishing of a given pathogen (Akoutou Mvondo et al., 2020). In particular, microclimatic variations are known to influence pests directly but also indirectly by affecting plant growth and thus the amount of resource for these different organisms (Ratnadass et al., 2012). However, these mechanisms are not exclusive (Akoutou Mvondo et al., 2019; Gidoïn, 2013). In the case of citrus in CBAS, it should be emphasized that other factors inherent to the system, such as spatial structure, must be considered to explain PFRD intensity. In other ways, apart from this effect of microclimatic factors resulting from plant biodiversity, it is also accepted to predict the suppressive effect of the microflora on *Phytophthora*. Indeed, we can assume that CBAS with dense shade have greater plant diversity, more litter, more biologically active soil, and thus more suppressive microflora. In other words, these systems better mimic a natural ecosystem where most pathogens are kept in balance by the activity of other organisms.

Phytophthora dynamics in CBAS and the contribution of physical effects in the regulation of PFRDC

Most *Phytophthora* species, including those parasitizing citrus, have little or no competitive colonization capacity; they have a poor ability to grow in non-sterile field soil, and long-term survival is accomplished by durable propagules such as chlamydospores and oospores (Brazier, 1998). Nevertheless, most *Phytophthora* species generally infest a wide range of plants in agricultural and natural ecosystems. Given the high floristic biodiversity found in CBAS, it is possible that *Phytophthora* species that infect citrus may find alternative hosts in these agrosystems. Indeed, several *Phytophthora* species attack various tree species commonly found in CBAS such as avocado, parasitized by *P. palmivora*, *P. cinnamomi*, *P. cactorum*, *P. citricola*, *P. citrophthora*, *P. heveae*, and *P. nicotianae* (Sarkhosh et al., 2018), mango,

parasitized by *P. palmivora*, *P. parasitica* and *P. citricola* (Rodriguez-Padron et al., 2018; Salgadoe et al., 2018; Sumida et al., 2020), kola tree (*Cola nitida*) (Nyasse & Efombagn, 2017), and above all, cocoa as the main crop, host *P. megakarya*, *P. palmivora* and *P. capsisci* (Pakora et al., 2018; Perrine-Walker, 2020). This high presence of alternative hosts of *Phytophthora* species may result in high infestation dynamics in CBAS. Thus, it can be perceived that as plant diversity within CBAS increases, there is also an increase in the likelihood that *Phytophthora* species infesting citrus will find alternative hosts (Ratnadass et al., 2012). However, for generalist pathogens, such as *Phytophthora*, it is difficult to define the balance between the effect of reducing its usual resource in the studied agroecosystem and the effect of the presence of an alternative resource with high potential. Nevertheless, results presented in this study showed that, among the most common species in CBAS, apart from mango and avocado trees, all others are not known as potential *Phytophthora* hosts. Moreover, since shade limits the spread of *Phytophthora*, and biodiversity leads to high rates of shade, a clear decrease in the PFRD intensity could be predicted in complex agroforestry systems.

In other regards, the high biodiversity in CBAS could contribute to the regulation of the pathogen through the physical effect of the system. Indeed, the physical effect of a plant on an organism is due to the fact that the plant acts as a physical barrier rather than as a living being (Keesing et al., 2006). This barrier directly affects the organism and its movements, but it also affects the abiotic variables of the system (light, water, wind), which creates a microclimate that affects the organism and its host plant (Gidoïn et al., 2014). Therefore, the physical effect is determined by the spatial structure of plants in the agroecosystem (Ndo & Akoutou Mvondo, 2021). Thus, the high biodiversity of CBAS in Cameroon contributes to the regulation of PFRD by the fact that citrus trees placed in the shade of other species benefit from these physical effect mechanisms. However, we can postulate that the balance depends to a large extent on the difference in susceptibility between the host plant species of the pest. It is therefore essential to study the dynamics of *Phytophthora* in order to determine the sensitivity of potential alternative hosts.

Shade rate and climatic variables determine PFRD intensity in cocoa-based agroforestry systems

It is generally acknowledged in plant epidemiology that the occurrence of the disease is the result of the action of the environment, the capacity of the pathogen, the genetic nature of the host plant, the interventions of the farmers as well as the interactions between these different factors (Zadoks & Schein, 1979). Indeed, according to the disease model of Zadoks (2001), the environment represents a primordial component in the development of an epidemic. In

the present study, the investigation focused on the importance of the direct environment and more precisely of the microclimate in the development and spread of PFRD on citrus in CBAS. The results showed that, contrary to the variables related to the specific composition of CBAS, climatic variables, or more precisely the microclimate, are determinant to explain the intensity of PFRD on citrus. Indeed, temperature, relative humidity, rainfall and shade rate were the only variables correlated with the intensity of PFRD on citrus. Several studies have shown the influence of environmental factors in various pathosystems (Midega et al., 2018). In particular, on various *Phytophthora* species, the effect of temperature, rainfall and that of relative humidity have been widely studied (Liu et al., 2018; Shelley et al., 2018). On citrus, Lad et al. (2021) showed that *Phytophthora* population and disease progression were directly proportional to environmental and soil parameters such as rainfall, relative humidity and soil moisture, but inversely proportional to air temperature.

Conclusion

The objective of this study was to assess the influence of shade level and associated tree diversity in CBAS on the intensity of PFRD. In terms of abundance, native forest trees were found to be the main providers of shade to understory crops. Introduced fruit trees and palms were also significantly present in CBAS. The 10 most frequent shade tree species in the CBAS studied represent more than 60% of the recorded shade trees.

The 3D reconstruction of the CBAS and the quantification of shade allowed the appreciation of significant variation in shade intensity between CBAS and within plots. Results showed that the average shade rate received by citrus trees ranged from 17 to 74%. Thus, within the same CBAS, citrus trees were located under different shade conditions. The results of this study showed that citrus trees are differently attacked by PFRD depending on whether they are located in full sun, light shade or dense shade. Those under dense shade were significantly less attacked by the disease in contrast to those under full sun. At the expense of factors related to the specific composition of the system, shade, temperature, relative humidity and rainfall were found to be the main factors explaining PFRD intensity in CBAS. This study shows that microclimatic alterations due to the introduction of biodiversity in tropical agroforestry systems contribute to significant pest control. Therefore, the excessive use of phytosanitary chemicals in pathogens control could be largely reduced.

Funding

This research was supported by the International Foundation for Science (IFS) through grant No. I-1-C-6218-1; the

DP Agroforesterie Cameroun through three financial grants awarded to PhD students between 2018 and 2020; and the Institute of Agricultural Research for Development (IRAD) through *Budget d'Investissement Public* 2019 (BIP).

Ethics approval

Not applicable.

Consent to participate

Verbal informed consent was obtained prior to the interview.

Consent for publication

The authors affirm that human research participants provided informed consent for publication of the images in Fig. 1.

Availability of data and mater

The datasets generated and analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Code availability

Not applicable.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no potential conflict of interest in relation to the study in this paper

Acknowledgements

Authors extend their gratitude to Dzokouo Dzoyem Camille Ulrich for the contribution in data statistical analysis.

References

- Abdulai, I., Jassogne, L., Graefe, S., Asare, R., Van Asten, P., Läderach, P., et al. (2018). Characterization of cocoa production, income diversification and shade tree management along a climate gradient in Ghana. *PLoS One*, 13(4), 1–17. doi:10.1371/journal.pone.0195777.
- Akoutou Mvondo, E., Ndo, E. G. D., Ngo Bieng, M.-. A., Ambang, Z., Bella Manga, Cilas, C.,

- Tsouga Manga, M. L., et al. (2019). Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and Phytophthora foot rot disease of citrus severity. *Agroforestry Systems*, 93(2), 493–502. doi:10.1007/s10457-017-0140-3.
- Akoutou Mvondo, E., Ndo, E. G. D., Tsouga Manga, M. L., Aba'ane, C. L., Abondo Bitoumou, J., Manga, B., et al. (2020). Effects of complex cocoa-based agroforests on citrus tree decline. *Crop Protection*, 130, 105051. doi:10.1016/j.cropro.2019.105051.
- Andres, C., Blaser, W. J., Dzahini-Obiatey, H. K., Ameyaw, G. A., Domfeh, O. K., Awiagah, M. A., et al. (2018). Agroforestry systems can mitigate the severity of cocoa swollen shoot virus disease. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 83–92. doi:10.1016/j.agee.2017.09.031.
- Asim, M., Iqbal, Z., Raza, W., Ahmad, S., Ghazanfar, M., & Raza, M. (2019). *Study of phytophthora associated with citrus decline*. 5, 404–409.
- Bennett, E. M., Baird, J., Baulch, H., Chaplin-Kramer, R., Fraser, E., Loring, P., et al. (2021). Ecosystem services and the resilience of agricultural landscapes. *Advances in Ecological Research*, 1–43. doi:10.1016/bs.aecr.2021.01.001.
- Bose, T., Hulbert, J. M., Burgess, T. I., Paap, T., Roets, F., & Wingfield, M. J. (2021). Two novel Phytophthora species from the southern tip of Africa. *Mycological Progress*, 20(6), 755–767. doi:10.1007/s11557-021-01702-y.
- Brazier, C. (1998). Phytophthora Diseases Worldwide. By D. C. Erwin and O. K. Ribeiro. St Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society (1996), pp. 562, £90. ISBN 0-89054-212-0. *Experimental Agriculture*, 34(1), 125–130. doi:10.1017/S001447979825109X.
- Chaudhary, S., Laughlin, D. A., Setamou, M., da Graça, J. V., Kunta, M., Alabi, O. J., et al. (2020). Incidence, severity, and characterization of phytophthora foot rot of citrus in Texas and implications for disease management. *Plant Disease*, 104(9), 2455–2461. doi:10.1094/PDIS-07-19-1493-RE.
- Choudhari, R., Gade, R., Lad, R., Jagarlapudi, A., & Phanindra, K. (2018). Epidemiological relations to phytophthora spp. *Causing Citrus Root Rot in Nagpur Mandarin*, 6, 406–417.
- Dornbush, M. E., & von Haden, A. C. (2017). Intensified agroecosystems and their effects on soil biodiversity and soil functions. *Soil health and intensification of agroecosystems* (pp. 173–193). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-805317-1.00008-7.
- Durand-Bessart, C., Tixier, P., Quinteros, A., Andreotti, F., Rapidel, B., Tauvel, C., et al. (2020). Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. *Crop Protection*, 133, 105137. doi:10.1016/j.cropro.2020.105137.
- Gade, R., & Lad, R. (2019). *Strategies for management of Phytophthora diseases in citrus in India* (pp. 435–451).
- Gidoïn, C. (2013). Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer: La moniliose au Costa Rica. *la pourriture brune et les mirides au Cameroun*, 212.
- Gidoïn, C., Babin, R., Beilhe, L. B., Cilas, C., Hoopen, G. M. T., & Bieng, M. A. N. (2014). Tree spatial structure, host composition and resource availability influence mirid density or black pod prevalence in cacao agroforests in cameroon. *PLoS One*, (10), 9. doi:10.1371/journal.pone.0109405.
- Graham, J., & Feichtenberger, E. (2015). Citrus phytophthora diseases: Management challenges and successes. *Journal of Citrus Pathology*, 2(1). <https://escholarship.org/uc/item/3db485rh>.
- Granke, L. L., & Hausbeck, M. K. (2010). Effects of temperature, humidity, and wounding on development of phytophthora rot of cucumber fruit. *Plant Disease*, 94(12), 1417–1424. doi:10.1094/PDIS-04-10-0258.
- Gyau, A., Smoot, K., Diby, L., & Kouame, C. (2015). Drivers of tree presence and densities: The case of cocoa agroforestry systems in the Soubre region of Republic of Côte d'Ivoire. *Agroforestry Systems*, 89(1), 149–161. doi:10.1007/s10457-014-9750-1.
- Gyeltshen, J., Dunstan, W. A., Grigg, A. H., Burgess, T. I., & St. J. Hardy, G. E. (2021). The influence of time, soil moisture and exogenous factors on the survival potential of oospores and chlamydospores of Phytophthora cinnamomi. *Forest Pathology*, 51(1), e12637. doi:10.1111/efp.12637.
- Jagoret, P., Michel-Dounias, I., Snoeck, D., Nngoué, H. T., & Malézieux, E. (2012). Afforestation of savannah with cocoa agroforestry systems: A small-farmer innovation in central Cameroon. *Agroforestry Systems*, 86(3), 493–504.
- Jagoret, P., Nngogue, H. T., Malézieux, E., & Michel, I. (2018). Trajectories of cocoa agroforests and their drivers over time: Lessons from the Cameroonian experience. *European Journal of Agronomy*, 101, 183–192.
- Jepson, P. C., Guzy, M., Blaustein, K., Sow, M., Sarr, M., Mineau, P., et al. (2014). Measuring pesticide ecological and health risks in West African agriculture to establish an enabling environment for sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369, (1639) 20130491. doi:10.1098/rstb.2013.0491.
- Kaur, Y., Thind, S. K., & Arora, A. (2021). Survival of Phytophthora nicotianae in citrus rhizosphere. *Journal of Plant Pathology*, 103(4), 1307–1313. doi:10.1007/s42161-021-00878-2.
- Keesing, F., Holt, R. D., & Ostfeld, R. S. (2006). Effects of species diversity on disease risk. *Ecology Letters*, 9(4), 485–498. doi:10.1111/j.1461-0248.2006.00885.x.
- Lad, R. S., Gade, R. M., Peddinti, S. R., & Adinarayana, J. (2021). Seasonal impact on population dynamics of Phytophthora spp. And disease progression in Mandarin. *Indian Phytopathology*. doi:10.1007/s42360-021-00332-4.
- Lakshmi, V., Jackson, T. J., & Zehrhuhs, D. (2003). Soil moisture–temperature relationships: Results from two field experiments. *Hydrological Processes*, 17(15), 3041–3057. doi:10.1002/hyp.1275.
- Liu, F., Li, B., Lian, S., Dong, X., Wang, C., Zhang, Z., et al. (2018). Effects of temperature and moisture on the infection and development of apple fruit rot caused by phytophthora cactorum. *Plant Disease*, 102(9), 1811–1819. doi:10.1094/PDIS-07-17-1028-RE.
- Mbolo, M. M. A., Zekeng, J. C., Mala, W. A., Fobane, J. L., Chimi, C. D., Ngavounsia, T., et al. (2016). The role of cocoa agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central region of Cameroon. *Agroforestry Systems*, 90(4), 577–590.
- Meena, R. L., Mathur, A. C., & Shivpuri, A. (2011). Environmental factors affecting disease development and viability of smut of pearl millet pathogen in soil. *Indian Phytopathology*, 64(4), 363–366. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123118387>.

- Midega, C. A. O., Pittchar, J. O., Pickett, J. A., Hailu, G. W., & Khan, Z. R. (2018). A climate-adapted push-pull system effectively controls fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J E Smith), in maize in East Africa. *Crop Protection*, 105(November 2017), 10–15. doi:10.1016/j.cropro.2017.11.003.
- Mukete, N., Zhou, L., Mukete, B., & Patricia, B. (2018). Cocoa production in cameroon: A socioeconomic and technical efficiency perspective. *International Journal of Agricultural Economics*, 3, 1–8. doi:10.11648/j.ijae.20180301.11.
- Ndo, E.G.D. (2011). *Evaluation des facteurs de risque épidémiologique de la Phaeoramulariose des agrumes dans les zones humides du Cameroun* (Cameroun) [Thesis, UM2]. <https://agritrop.cirad.fr/562661/>
- Nesper, M., Kueffer, C., Krishnan, S., Kushalappa, C. G., & Ghazoul, J. (2017). Shade tree diversity enhances coffee production and quality in agroforestry systems in the Western Ghats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 172–181. doi:10.1016/j.agee.2017.06.024.
- Ngo Bieng, M. A., Gidoin, C., Avelino, J., Cilas, C., Deheuvelds, O., & Wery, J. (2013). Diversity and spatial clustering of shade trees affect cacao yield and pathogen pressure in Costa Rican agroforests. *Basic and Applied Ecology*, 14(4), 329–336. doi:10.1016/j.baae.2013.03.003.
- Nijmeijer, A., Lauri, P.-É., Harmand, J.-M., & Saj, S. (2019). Carbon dynamics in cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: Afforestation of savannah as a sequestration opportunity. *Agroforestry Systems*, 93(3), 851–868.
- Nyasse, S., & Efombagn, M. I. B. (2017). Preliminary observations on *Phytophthora* sp. on kola (*Cola nitida*) (Vent.) Schott and Endlicher: Implications in epidemiology of the black pod disease of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in Cameroon. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 6(1), 49–52. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173108190>.
- Oke, A. O., Oladigbolu, A. A., Kunta, M., Alabi, O. J., & Sétamou, M. (2020). First report of the occurrence of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae), an invasive species in Nigeria, West Africa. *Scientific Reports*, 10(1), 9418. doi:10.1038/s41598-020-66380-4.
- Pakora, G.-A., Mpika, J., Kone, D., Ducamp, M., Kebe, I., Nay, B., et al. (2018). Inhibition of *Phytophthora* species, agents of cocoa black pod disease, by secondary metabolites of *Trichoderma* species. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(30), 29901–29909. doi:10.1007/s11356-017-0283-9.
- Panth, M., Hassler, S. C., & Baysal-Gurel, F. (2020). Methods for management of soilborne diseases in crop production. *Agriculture*, 10(1), 16. doi:10.3390/agriculture10010016.
- Perrine-Walker, F. (2020). *Phytophthora palmivora*—cocoa interaction. *Journal of Fungi*, 6(3), 167. doi:10.3390/jof6030167.
- Pietikäinen, J., Pettersson, M., & Bååth, E. (2005). Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates. *FEMS Microbiology Ecology*, 52(1), 49–58. doi:10.1016/j.femsec.2004.10.002.
- Pingali, P. L. (2012). Green revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(31), 12302–12308. doi:10.1073/pnas.0912953109.
- Poeydebat, C., Castagnéyrol, B., Halder, I. van, & Jactel, H. (2021). Changes in host basal area explain associational resistance of mixed forests to primary pests. *Forest Ecology and Management*, 495, 119374. doi:10.1016/j.foreco.2021.119374.
- Puglisi, I., Patrizio, A. D., Schena, L., Jung, T., Evoli, M., Pane, A., et al. (2017). Two previously unknown *Phytophthora* species associated with brown rot of Pomelo (*Citrus grandis*) fruits in Vietnam. *PLoS One*, 12(2) e0172085. doi:10.1371/journal.pone.0172085.
- Pumariño, L., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Kaartinen, R., Barrios, E., Muchane, M. N., et al. (2015). Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, 16(7), 573–582. doi:10.1016/j.baae.2015.08.006.
- R: *The R Project for Statistical Computing*. (n.d.). Retrieved June 25, (2022)., from <https://www.r-project.org/>
- Rao, M. V., Rice, R. A., Fleischer, R. C., & Muletz-Wolz, C. R. (2020). Soil fungal communities differ between shaded and sun-intensive coffee plantations in El Salvador. *PLoS One*, 15(4) e0231875. doi:10.1371/journal.pone.0231875.
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 273–303. doi:10.1007/s13593-011-0022-4.
- Ristaino, J. B. (2012). A lucid key to the common species of *phytophthora*. *Plant Disease*, 96(6), 897–903. doi:10.1094/PDIS-08-11-0636.
- Rodriguez-Padron, C., Siverio, F., Perez-Sierra, A., & Rodriguez, A. (2018). Isolation and pathogenicity of *Phytophthora* species and *Phytophthora vexans* recovered from avocado orchards in the Canary Islands, including *Phytophthora niederhauserii* as a new pathogen of avocado. *Phytopathologia Mediterranea*, 57(1), 89–106.
- Ruf, F., & Schroth, G. (Eds.). (2015). *Economics and ecology of diversification*. Netherlands: Springer. doi:10.1007/978-94-017-7294-5.
- Saj, S., Jagoret, P., Etoa, L. E., Eteckji Fonkeng, E., Tarla, J. N., Essobo Nieboukaho, J.-D., et al. (2017). Lessons learned from the long-term analysis of cacao yield and stand structure in central Cameroonian agroforestry systems. *Agricultural Systems*, 156, 95–104. doi:10.1016/j.agsy.2017.06.002.
- Salgadoe, A. S. A., Robson, A. J., Lamb, D. W., Dann, E. K., & Searle, C. (2018). Quantifying the severity of *phytophthora* root rot disease in avocado trees using image analysis. *Remote Sensing*, 10(2), 226. doi:10.3390/rs10020226.
- Sawake, M. M., Moharil, M. P., Ingle, Y. V., Jadhav, P. V., Ingle, A. P., Khelurkar, V. C., et al. (2022). Management of *Phytophthora parasitica* causing gummosis in citrus using biogenic copper oxide nanoparticles. *Journal of Applied Microbiology*, 132(4), 3142–3154. doi:10.1111/jam.15472.
- Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P., & van Zanten, H. H. E. (2020). Regenerative agriculture – The soil is the base. *Global Food Security*, 26, 100404. doi:10.1016/j.gfs.2020.100404.
- Schroth, G., & Harvey, C. A. (2007). Biodiversity conservation in cocoa production landscapes: An overview. *Biodiversity and Conservation*, 16(8), 2237–2244. doi:10.1007/s10531-007-9195-1.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., et al. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1446. doi:10.1007/s42452-019-1485-1.

- Shelley, B. A., Luster, D. G., Garrett, W. M., McMahon, M. B., & Widmer, T. L. (2018). Effects of temperature on germination of sporangia, infection and protein secretion by *Phytophthora kernoviae*. *Plant Pathology*, *67*(3), 719–728. doi:10.1111/ppa.12782.
- Shukla, A., Kumar, A., Jha, A., Chaturvedi, O. P., Prasad, R., & Gupta, Ajit (2009). Effects of shade on arbuscular mycorrhizal colonization and growth of crops and tree seedlings in Central India. *Agroforestry Systems*, *76*(1), 95–109. doi:10.1007/s10457-008-9182-x.
- Sonwa, D. J., Weise, S. F., Schroth, G., Janssens, M. J. J., & Shapiro, Howard-Yana (2014). Plant diversity management in cocoa agroforestry systems in West and Central Africa—Effects of markets and household needs. *Agroforestry Systems*, *88*(6), 1021–1034. doi:10.1007/s10457-014-9714-5.
- Souza, H. N.de, de Goede, R. G. M., Brussaard, L., Cardoso, I. M., Duarte, E. M. G., Fernandes, R. B. A., et al. (2012). Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *146*(1), 179–196. doi:10.1016/j.agee.2011.11.007.
- Sumida, C. H., Fantin, L. H., Braga, K., Canteri, M. G., & Homechin, M. (2020). Control of root rot (*Phytophthora cinnamomi*) in avocado (*Persea Americana*) with bioagents. *Summa Phytopathologica*, *46*(3), 205–211. doi:10.1590/0100-5405/192195.
- Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., et al. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(3), 1112. doi:10.3390/ijerph18031112.
- Warra, A. A., & Prasad, M. N. V. (2020). Chapter 16—African perspective of chemical usage in agriculture and horticulture—Their impact on human health and environment. In M. N. V. Prasad (Ed.), *Agrochemicals detection, treatment and remediation* (pp. 401–436). Butterworth-Heinemann. doi:10.1016/B978-0-08-103017-2.00016-7.
- Zadoks, J. C. (2001). Plant disease epidemiology in the twentieth century: A picture by means of selected controversies. *Plant Disease*, *85*(8), 808–816. doi:10.1094/PDIS.2001.85.8.808.
- Zadoks, J. C., & Schein, R. D. (1979). Epidemiology and plant disease management. *Epidemiology and Plant Disease Management*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19801361394>.

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and Phytophthora foot rot disease of citrus severity

Etienne Akoutou Mvondo, Eunice Golda Danièle Ndo, Marie-Ange Ngo Bieng, Zachée Ambang, Bella Manga, Christian Cilas, et al.

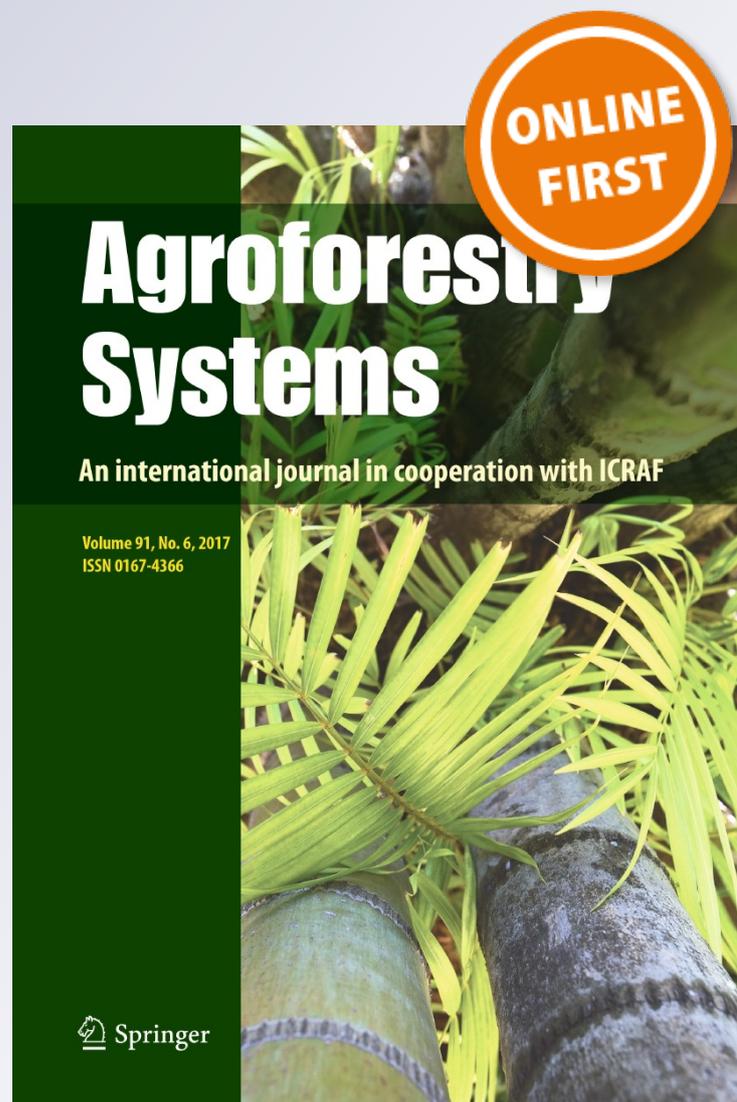
Agroforestry Systems

An International Journal incorporating
Agroforestry Forum

ISSN 0167-4366

Agroforest Syst

DOI 10.1007/s10457-017-0140-3



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer Science+Business Media B.V.. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".

Assessment of the interaction between the spatial organization of citrus trees populations in cocoa agroforests and *Phytophthora* foot rot disease of citrus severity

Etienne Akoutou Mvondo · Eunice Golda Danièle Ndo · Marie-Ange Ngo Bieng · Zachée Ambang · Bella Manga · Christian Cilas · Milie Lionnelle Tsouga Manga · Lucien Bidzanga Nomo

Received: 25 April 2017 / Accepted: 8 October 2017
© Springer Science+Business Media B.V. 2017

Abstract Complex agroforestry systems are known to be less conducive to the dispersion of plant pathogenic germs. These systems, which combine many species components provide a means of improving environmental and regulatory mechanisms of disease. The spatial structure, which is a basic characteristic of these systems, has often been indicated as one of the ecological pest control tool. This study was conducted to identify the interaction between the spatial structure of citrus in cocoa agroforests and the severity of *Phytophthora* foot rot disease of citrus (PFRDC) in the humid zones of Cameroon. The spatial structure of 19 cocoa based agroforests selected in three sites was analysed by

L(r) Ripley modified function. The three sites were selected in two forest zones and in a savannah-forest transition zone. Disease severity was characterized on 438 citrus trees, during three rainy seasons and leaf flare periods. The biodiversity of this system was thus proven and in general, the spatial structure of citrus in the plots was random tend to be regular or aggregate. Plots with aggregate and random spatial structure were significantly attacked by PFRDC compared to regular spatial structure. This allows not only to demonstrate the involvement of the spatial structure of citrus on developing PFRDC in this culture system, but already opens a way for improvement of cocoa agroforests in terms of its structure.

E. Akoutou Mvondo · E. G. D. Ndo (✉) · Bella Manga · M. L. Tsouga Manga · L. Bidzanga Nomo
Centre Régional de Recherche Agricole de Nkolbisson,
IRAD, BP 2067 Yaoundé, Cameroon
e-mail: eunicendo@gmail.com

E. Akoutou Mvondo · Z. Ambang
Département de Biologie et Physiologie Végétale,
Université de Yaoundé 1, Yaoundé, Cameroon

C. Cilas
CIRAD, UPR Bioagresseurs, 34398 Montpellier, France

M.-A. Ngo Bieng
CIRAD, UMR SYSTEM, 34398 Montpellier, France

M.-A. Ngo Bieng
CATIE, Programa BOSQUES, BIODIVERSIDAD Y
CAMBIO CLIMÁTICO, Turrialba 30501, Costa Rica

Keywords Pest control · Gummosis · Agroforestry system · Ripley function · Spatial organization

Introduction

In Cameroon, citrus fruit production constitutes an important source of income for many producers. Among the species commonly grown, orange (*Citrus sinensis*), tangerine (*Citrus reticulata*), grape fruit (*Citrus paradisi*) and lemon trees (*Citrus lemon*) are the most important ones, economically wise. They are usually introduced in cocoa or coffee orchards as a means to diversifying the source of income of producers (Ndo 2007). Beside these, indigenous tree

species, including non-timber forest products (NTFP) are maintained in the systems for various reasons. The complexity of these systems call for diverse interactions, including the occurrence and control of pathogens (Sonwa et al. 2007; Rao et al. 1998).

Phytophthora spp. is a water mold (Class Oomycetes) that is found throughout the world and constitutes the most damaging plant fungi pathogen on citrus in tropical areas (Graham and Timmer 2006). There exist twelve *Phytophthora* species affecting citrus, however, *P. parasitica* and *P. citrophthora* are those that cause the most damage (Cacciola di San Lio 2008). *P. parasitica* is mainly found in tropical areas. Under favorable conditions (high moisture and temperature) it produces large numbers of motile zoospores that can swim in water for short distances (Bowers et al. 1990). Splashing from the soil to the aerial organs also promote the dispersion of *Phytophthora* (Madden 1998). These biflagellate zoospores are the infective agents that may be dispersed in the air by wind, rain or irrigation (Hirst and Stedman 1960; Zwankhuizen et al. 1998).

One of the damages caused by *Phytophthora* spp. is *Phytophthora* foot rot disease of citrus (PFRDC). This disease also called gummosis (Fig. 1) can cause like other diseases such as *Pseudocercospora* leaf and fruit spot disease almost 100% of citrus production losses in tropical Africa. The fight against PFRDC includes use of grafted plants with resistant rootstocks and spraying of chemical fungicides (Dewdney and Timmer 2010). However, small producers mostly use seedlings, and the use of chemicals is not affordable by this category of farmers. Moreover, it does not give suitable results as PFRDC is a soil borne disease, difficult to confine in agroforests. Therefore, there is a need to look for an ecological method affordable by farmers.

The effect of spatial organization of a plant community on disease spread has been demonstrated. It has been shown that the aggregate spatial structure is conducive to disease dissemination (Brown and Bolker 2004). The spatial structure or organization of a plant community is the vertical and horizontal arrangement of the constituent elements (Goreaud 2000). It reflects the local environment around each individual (Ngo Bieng et al. 2013). Indeed, this environment around a host may have an impact on pathogens dynamics at different levels of their life cycle. Biodiversity in agroforestry systems dilutes the pathogen's resource and thus reduces its presence and damages (Mitchell

et al. 2002). Within agroforest, non-host plants mainly perform a physical barrier effect on pests (Oro et al. 2012). Spatial organization of plant population can also affect pathogen success of contamination by microclimate altering mechanisms (Ratnadass et al. 2012; Calonnet et al. 2013). The presence of shade trees (large forest trees and other fruit trees) drops the temperature of the air and soil; reduces wind speed and alters the quality and quantity of light transmitted to the lower strata. It also increases the relative humidity of the air and soil in the sub-floor (Beer et al. 1997).

On citrus, the involvement of the spatial structure in the spread of *Pseudocercospora angolensis* was shown (Ndo et al. 2010). In cocoa agroforests, plant communities are present in different spatial organizations based on strategy and farms management (Gidoïn et al. 2014). In the case of PFRDC, is there any interaction between spatial organization of citrus trees and disease severity? It is in this perspective that this study was carried out in order to determine the link between the spatial organization of citrus trees at plot level and the severity of *Phytophthora* foot rot disease of citrus. This could enable to identify the least favorable spatial structure for the dissemination of *Phytophthora* spp. in cocoa agroforests.

Materials and methods

Study sites and sampling plots

The study was conducted at three sites (Fig. 2) situated in the southern part of Cameroon, which is characterized by two agro-ecological zones:

- The mono-modal rain fall patterns in the humid forest zone (latitude 2.6°N–6.12°N, longitude 8.48°E–10.30°E, altitude 200–800 m). The zone is characterised by very humid and hot climate with annual average temperatures of 22–29 °C and a relative humidity of 85–95%. The average annual rainfall ranges from 2500 to 4000 mm. The dry season ranges from December to February, and the rainy season ranges from March to November. The soils are sandy to sandy clay or clayey in texture. In this area, the work was carried out in a forest area called Muyuka (latitude 4.29°N; longitude 9.41°E; altitude: 305 m; average annual rainfall: 3000 mm).

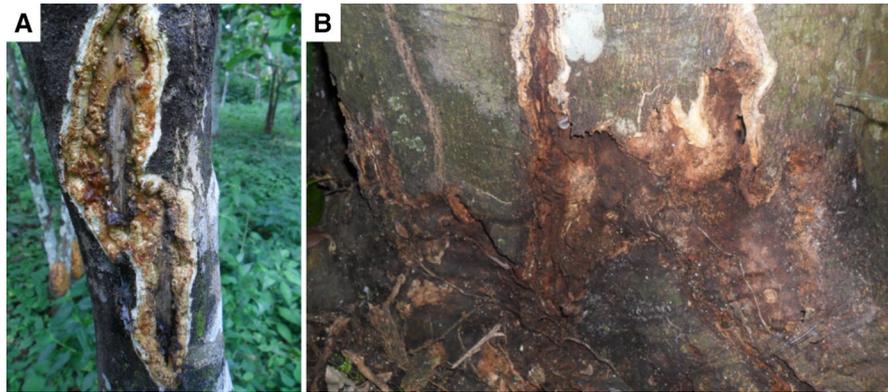


Fig. 1 Symptoms of citrus disease caused by *Phytophthora* spp.: gum flow on orange tree trunk (a) and aggravated assault on orange tree foot (b)

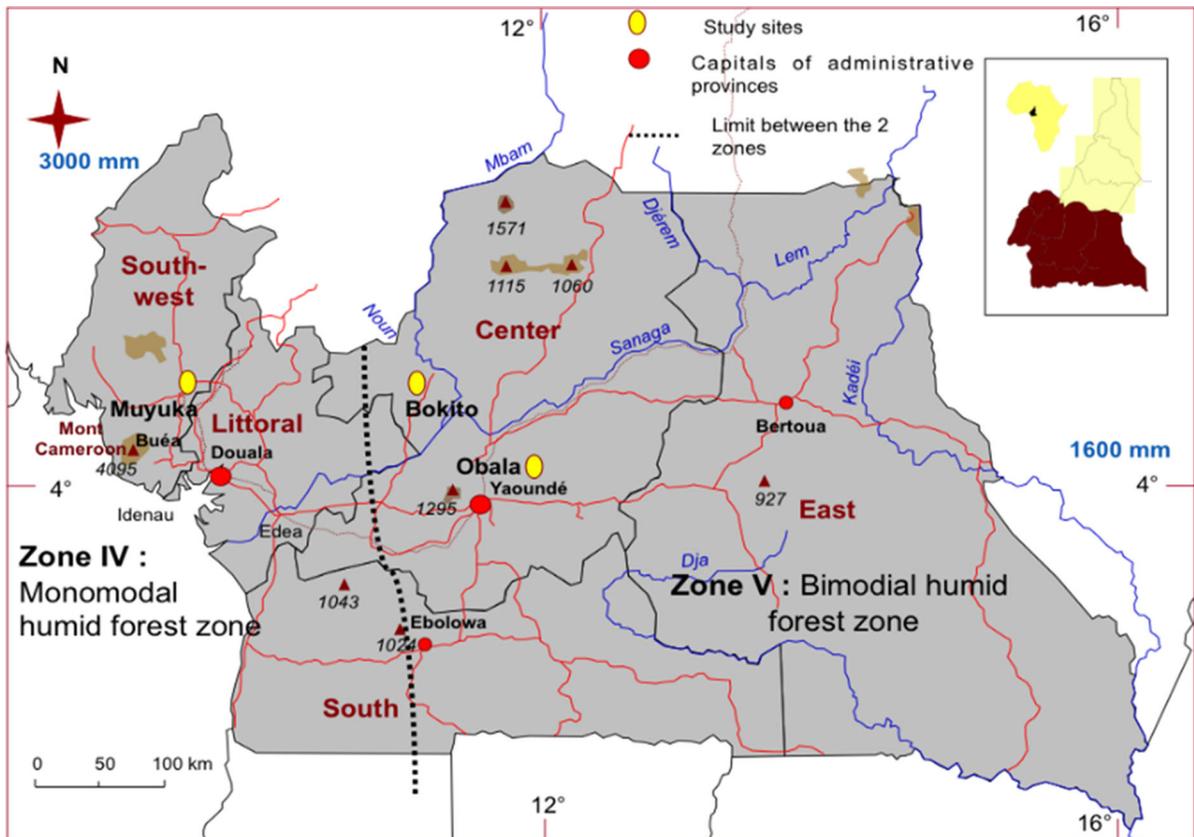


Fig. 2 Location of the study sites in two agro-ecological humid zones of Cameroon. The study sites are Muyuka (monomodal humid forest zone), Bokito and Obala (bimodal humid forest zone)

– The bimodal humid forest zone (latitude 2.6°N–4.54°/5.48°N, longitude 10.30°E–16.12°E, altitude: 500–1000 m). The climate in this zone is

hot and humid with temperatures of about 25 °C and an average relative humidity of 75%. Here, there are two rainy seasons (March–June and

September–November). The soils are sandy loam, sandy clay loam or clay in texture. The work was done in two sites: Obala and,

- (i) The Obala site is a forest area (latitude 4.16°N, longitude 11.31°E, altitude: 542 m, Average annual rainfall is 1638 mm, and the average temperature is 24.7 °C).
- (ii) The Bokito site is a forest-savannah transition zone (latitude 4.56°N, longitude 11.09°E, altitude: 488 m, the average annual rainfall is 1721 mm, average temperature is 25.2 °C).

The climatic and soil conditions within the three study sites—Muyuka, Obala and Bokito—are rather homogeneous and thereby can ensure similar high levels of production. In fact, these three sites were chosen because they are situated in the main citrus production basins of Cameroon. They supply the fresh fruits markets of the biggest cities of Cameroon (Douala and Yaoundé) and in neighbouring countries (Temple 2001). However, over years, the productions in these sites have decreased and one of the reasons evoked by the producers and mentioned by several studies is the presence of this disease that is becoming one of the biggest constraints in these areas (Kuate et al. 2006; Ndo et al. 2010).

Experimental design

A network of 19 plots in the three study sites was set up: five in Obala, six in Muyuka and eight in Bokito (Table 1). Cocoa agroforest systems with at least ten individuals of citrus trees (all species) in the plot area were selected. Each plot area was a square of at least 2500 m² (50 × 50 m). Plots were chosen in villages among the most productive areas and also representative of the study zone in terms of system diversity and variability of citrus species produced.

Characterization of vegetation structure

In order to characterize the spatial structure and the vegetation composition in each of the sample plot, the X and Y Cartesian coordinates of each perennial plant (2 m tall) were measured using decametres (Ngo Bieng et al. 2013) and were recorded in each bordered plot. Plots with less than 10 citrus trees in an initial 2500 m² were enlarged to contain at least ten citrus trees. In addition to cocoa trees, several species of

Table 1 Distribution and surfaces of chosen cocoa agroforestry plots in study sites in the humid zones of Cameroon

Study sites	Villages	Plots number	Surface (m ²)
Muyuka	Owé	Plot 1	2800
	Owé	Plot 2	4158
	Owé	Plot 3	4071
	Ikata	Plot 4	5518
	Ikata	Plot 5	3782
	Yoké	Plot 6	2500
Bokito	Boundigui	Plot 7	7189
	Boundigui	Plot 8	6699
	Ongolo	Plot 9	3844
	Ongolo	Plot 10	3400
	Bougnogon	Plot 11	3500
	Bougnogon	Plot 14	2500
	Mokol o	Plot 15	2800
	Mokolo	Plot 16	2850
	Zima	Plot 13	4080
Obala	Mbakomo	Plot 17	5733
	Mbakomo	Plot 16	6052
	Mbakomo	Plot 19	6080
	Mbakomo	Plot 18	6120

forest trees, fruit trees, palm oil, annual, and biannual crops were present in the system. These plants have been grouped into five subpopulations: cocoa trees, forest trees, other fruit trees (except citrus), citrus trees and palm oil. Annual plants present in the plots were not taken into consideration.

Evaluation of PFRDC severity on citrus: frequency and season

Epidemiological data were collected by noting the severity of PFRDC on a scale varying from 1 to 4, where 1 represented the level of trees without any symptom of foot rot and 4 the level of trees with more than 50% of the foot covered by the disease symptoms (rot, gummosis).

We assessed the disease severity in humid zone of Cameroon where two main flowering periods, which follow the leaf flare on citrus, are observed (Kuaté 1998). These periods correspond to the rainy seasons. The first took place between March and June and the second from September to December. As part of this study, in order to define these two periods and find fruit on trees, three observations were made. The first observation was made from July to October 2013, the

second from March to April 2014 and the third from August to October 2014.

Spatial structure analysis

Following the method illustrated in Ngo Bieng et al. (2013), we built a typology of spatial structure of citrus trees in the study plots. In the first step, we characterized the horizontal spatial structure of citrus trees in each plot using modified Ripley function $L(r)$. The $L(r)$ function is based on the calculation of the expected number of neighbour trees within a distance r from a given citrus tree in the plot. This method enables to distinguish three types of spatial patterns: regular when $L(r) \leq 0$, aggregated when $L(r) \geq 0$, and random when $L(r) = 0$. When analysing spatial structure, the statistical significance of the regular or aggregated spatial pattern of the trees in the study plots was assessed by comparing the calculated $L(r)$ value to a 95% confidence interval calculated based on 1000 simulations of the classic null hypothesis of complete spatial randomness (CSR). We only analysed the spatial structure of the citrus trees in the study plots, as we were interested in the relationship between spatial structure of citrus trees and PFRDC severity.

In the second step, a hierarchical cluster analysis based on the Euclidean distance between values of the $L(r)$ function of the citrus trees in different plots was performed. This spatial analysis was done with `ads` package R 3.3.0 software.

Disease severity

Severity index were log transformed in order to respect the normal distribution assumption. From the observation of disease severity in different study plots, a mean severity index of each plot was computed. Therefore, in order to detect a difference in disease severity between the different types of spatial structure and between the three study sites an ANOVA was performed. A comparison of means was done later using the Turkey test. `Rcmdr` and `Factminer` Package of the R 3.3.0 software was used to perform these analyses.

Factors associated with PFRDC severity on citrus

An evaluation using different biotic and abiotic factors (period of observation, site, citrus species, spatial

structure) was done, to select the main factors involved in PFRDC severity. The dependent variable was PFRDC severity. This was done through a regression analysis using GLM (General Linear Model) procedure of the SAS (Statistical Analysis System) software, version 9.3. For the factors significantly associated to PFRDC severity, a comparison of disease means was done using the SNK test at 5% probability.

Results and discussion

Biodiversity

Results from analysis showed that, five subpopulations were present in the three studied sites and that, cocoa trees represented 85.62% fairly in studied site. The Muyuka site had plots containing the larger percentages of cocoa trees (88.04%) compare to Obala and Bokito sites (85.81 and 83.01% respectively). Forest trees and other fruits trees were mostly present in Obala, while plots in Bokito had the larger percentage of citrus trees. Farms in Muyuka site showed a very low specific diversity and were much more like bi-specific farms (cocoa and citrus fruits). The map of plot 19 (Fig. 3) illustrates the biodiversity of plots in these agroforests, with the presence of five subpopulations.

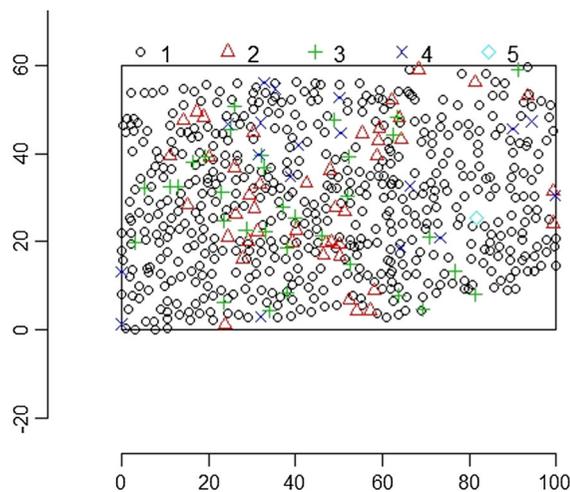


Fig. 3 Map of a cocoa agroforestry plot with all the tree subpopulation present in Obala site. 1 Cocoa; 2 forest; 3 other fruit trees; 4 citrus trees; 5 palm oil

Despite the fact that some sub-populations were not present in certain fields, that are much more like bivariate farms (citrus and cocoa), the majority of plots included in this study showed some associations remarkably different in subpopulations. This species diversity involves not only the number and quality of host or non-pathogenic species present in these fields, but also the diversity of strata. Thereby changing so disproportionately microclimate from one point to another within same plot. This species diversity also results in a variety of spatial structure that, could be adopted by the plant stand. The complexity of this system is therefore highlighted (Sonwa et al. 2007).

Composition of citrus subpopulation

Four citrus species namely: orange, tangerine, grapefruit and lemon were found in the different studied sites. Orange trees were the predominant species among citrus; it was the most representative citrus tree in Muyuka and Bokito with proportions of 31.95 and 55.33% respectively. Tangerines were predominant in Obala with a proportion of 12.43%, while in Bokito, their proportion was 17.49%. Grapefruits were absent in Muyuka and very little were presented in Obala and Bokito (2.66 and 2.37% respectively). Although

smaller in numbers, lemon trees were nevertheless present in all sites. These results are similar to those found by previous studies (Kuate et al. 2006; Ndo 2007). In terms of species proportion, orange trees are always predominant species in these zones.

Typology of spatial structure of citrus trees

The Analysis of spatial structure as performed with the Ripley function highlighted a variety of spatial organizations of citrus trees in the 19 study plots. The representation in a dendrogram, showed three main groups (Fig. 4): the first with a regular spatial organization (in the green circle); the second with a random spatial organization (in the red circle); and the third with an aggregated spatial organization (in the blue circle).

As highlighted in the dendrogram, citrus trees in seven plots displayed a regular spatial organization. These plots belonged to all the three sites (plot 2 and 6 from Muyuka; plots 8, 10 and 14 from Bokito; plots 12 and 19 from Obala). Citrus trees in nine plots displayed a random spatial organization. These plots belonged to all the three sites (plot 1, 3 and 5 from Muyuka; plots 9, 11, 13 and 15 from Bokito; plots 16 and 17 from Obala). Citrus trees in 3 plots displayed an aggregated spatial organization. These plots also belonged to all the 3 sites (plot 4 from Muyuka; plot 7 from Bokito; plots 18 from Obala).

The plot 19 (Fig. 5a) illustrates this spatial organization, where the citrus trees are aggregated within the area of the plot. The correspondent $L(r)$ function (Fig. 5b) highlighted significant positive values with a peak at 9 m, meaning that the trees are aggregated in cluster with a mean radius of 9 m.

These results corroborate those of Gidoïn (2013). This author affirmed that the fruit trees in cocoa agroforests in this region have a spatial structure that could be described as intermediate between forest trees and that of cocoa. Indeed, cocoa and citrus fruits (like other fruit trees) are trees introduced by producers in cocoa agroforests. Indeed, cocoa and citrus fruits (like other fruit trees) are trees introduced by producers in cocoa agroforests.

This justifies the regularity of citrus in 37% of the plots. Furthermore, the observed Random spatial structure could probably be explained by the willingness of farmers to achieve a uniform shade of cocoa trees in the plots. Thus, depending on the existing

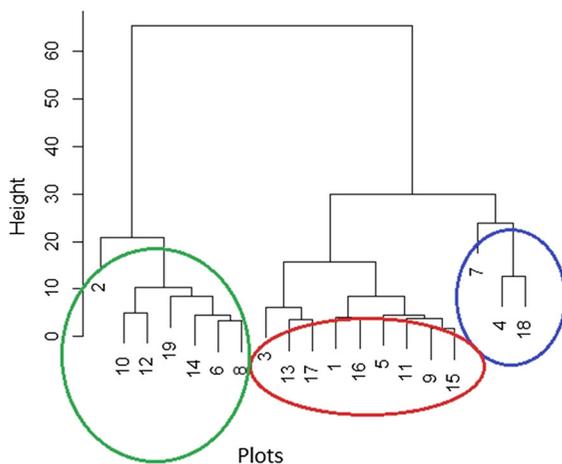


Fig. 4 Representation of the hierarchical cluster analysis set up to characterize the different spatial organization of citrus trees in the 19 cocoa agroforestry plots. The plots in the green circle are those in which the citrus tree has a regular spatial structure; the red circle indicates the plots in which the citrus fruit has a random spatial structure; and the blue circle, the plots in which the citrus fruits are an aggregated spatial structure. (Color figure online)

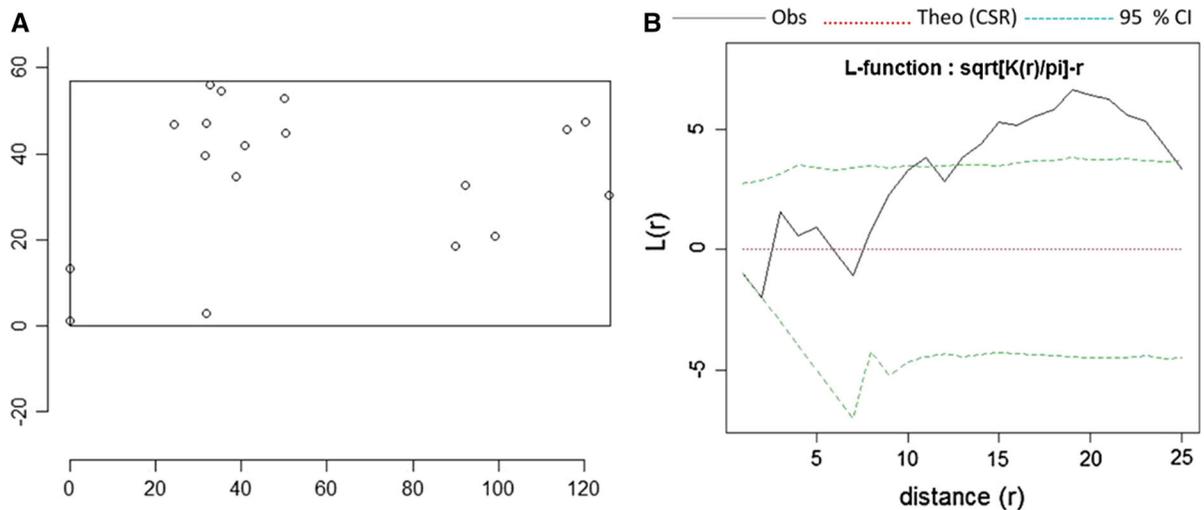


Fig. 5 **a** Map of the citrus trees in the study plot 19 which presents an aggregate spatial organization and **b** its corresponding $L(r)$ function

distribution of forest trees in the plot, fruit trees will be planted preferentially in areas of land where forest trees produce few (if any) shading, which has the double advantage to maximize the production of fruit trees themselves, while creating shade for growing interest; simultaneously. The aggregated structure, much less present in the sites was likely due to the natural regeneration of trees. In other cases, the farmers can introduce fruit trees in vacancies stands of cocoa. However, other reasons such as the limitation of land can lead to this mode dispersion of trees (this was observed at the plot P7).

PFRDC severity and spatial structure

The results showed a highly significant difference in the mean severity of the foot rot attacks among the three groups of spatial structure. Plots with a regular spatial structure are less attacked by PFRDC and those with aggregated and random spatial structure are well over (Table 2).

Brown and Bolker (2004) argued that the aggregation of host populations promotes dispersion of pathogen while its regularity decreases it. Indeed, when citrus stands are aggregated without any physical barrier between them, *Phytophthora* spp. zoospores move easily from infected stands to healthy ones, generally from one root to another. In such spatial structures, splashing from the soil to the aerial organs is also a facilitated (Shew 1987; Neher and

Duniway 1992). In random spatial structures, some citrus trees can be aggregated while others can be regularly distributed. This can therefore justify the high severity of illness in plots with the aggregate and random spatial structure unlike those regular spatial structures. Consequently, this result is showing the involvement of the spatial structure of citrus in cocoa agroforests on PFRDC dissemination on citrus tree. Furthermore, the spatial structure of *Phytophthora* spp. inoculum in the soil is random or aggregated (Di San Lio 1994; Graham and Timmer 2006).

However, the spatial structure alone does not justify the level of severity of PFRDC observed on farms. Other biotic and abiotic parameters that must be much well determined are also significantly influencing the dissemination of *Phytophthora* spp.

Factors associated with PFRDC severity on citrus

The regression analysis showed that observation period, sites and spatial structure were the main variables associated with the severity of PFRDC (Table 3). As far as the observation period is concerned, there is no difference in disease severity between the first two periods. The disease severity is different from one site to another. Obala site has the highest disease severity, followed by Bokito. Concerning spatial structure, the comparison showed no significant difference in disease severity between random and aggregated spatial structure. Disease

Table 2 Severity of *Phytophthora* foot rot disease of citrus based spatial structure groups are citrus into the cocoa agroforestry based system

Plots groups	<i>Phytophthora</i> foot rot disease of citrus severity
Regular plots	0.08 ± 0.38 ^b
Random plots	0.23 ± 0.60 ^a
Aggregated plots	0.28 ± 0.66 ^a
Anova/Tukey-test	
df	2
F value	11.83
P (> f)	8.11e-06***

In the same column, values with the letter similar not significantly different (Tukey HSD test $P < 0.05$)

*** indicates highly significant

Table 3 Variables associated with *Phytophthora* foot rot disease of citrus severity on citrus in three citrus production sites in the humid zones of Cameroon following a regression analysis

Source	df	Root mean square	F value	Pr > F
Observation period	2	0.082	11.93	< 0.0001
Species	3	0.003	0.38	0.7709
Sites	2	0.087	12.65	< 0.0001
Spatial structure	2	8.00	34.94	0.0004
Model's parameters				
R-square	0.04838			
CV	25.5651			
df	9			
F value	7.37			
Pr > F	< 0.0001			

severity in these two categories was higher than severity in regular spatial structure (Table 4).

Disease severity was not justified completely by the spatial structure of host individuals. The sites with different climatic and soil conditions are also associated with disease severity. More investigations are needed to determine the specific parameter involve in disease severity. However, it is known that *Phytophthora* spp. produces large number of motile zoospores that can swim in water for short distances under high moisture and temperature conditions (Futch and

Graham 2012). The observation period was also involved in disease severity. The relevance of these attacks has been highlighted during the field visits because from the early end to their observations, 5 marked trees died of severe attacks of PFRDC. This can justify the difference in severity, as a dead tree is no more observed. This sudden death may be justified by the fact that *Phytophthora* spp. may not show symptoms on aerial organs for some time; and yet, drivers obstruct channels gradually as noted by Graham (1995). Indeed, this strong PFRDC severity

Table 4 Comparison of *Phytophthora* foot rot disease means within different levels of associated variables in three citrus production sites of Cameroon

Associated variables	Observation period		Site		Spatial structure	
Levels	July–November 2013	0.337 ^a	Obala	0.349 ^a	Regular	0.314 ^b
	March–may 2014	0.329 ^a	Muyuka	0.312 ^c	Random	0.331 ^a
	August–November 2014	0.310 ^b	Bokito	0.325 ^b	Aggregated	0.339 ^a

In the same column, values with the letter similar not significantly different (Tukey HSD test $P < 0.05$)

would have been favored not only by the presence of favorable environmental conditions for *Phytophthora* spp., but also by the lack of phytosanitary treatments on citrus fruits and the fact that the majority of trees are not grafted (Kuate et al. 2006). The high PFRDC severity on citrus in cocoa agroforests can also be encouraged by the strong dynamics of the inoculum in this system. Indeed, the cocoa tree, which is the main crop, and other tree species is heavily attacked by *Phytophthora* spp. All these are therefore secondary hosts of *Phytophthora* spp. and contribute to the inoculum thus ensuring conservation of new infections.

Conclusion

The enrichment of knowledge base and understanding of the structural properties of cocoa agroforests is a line of research to focus at this time when it is imperative to reconcile the quantity and quality of production, and environmental protection. The present study was conducted to identify the interaction between the spatial structure of citrus in these systems and PFRDC severity. The results obtained allowed to appreciate the biodiversity and complexity of these systems; which undoubtedly generate a multiplicity of spatial structure of plant communities, from one farm to another. In general, the spatial structure of the 19 plots surveyed is random and tends to be aggregated or regular. Furthermore, irrespective of their spatial structure, these farms all show PFRDC attacks less or more pronounced. However, these results show that, the disease significantly attacks plots with aggregated and random spatial structure unlike those with regular spatial structure. The results also demonstrated that, the spatial structure of plant community in cocoa agroforests has an impact on the development of the *Phytophthora* disease severity epidemic. Hence, adopting a regular spatial structure of citrus, with considerable distances; the orientation and a choice of shade trees in cocoa agroforests, can therefore, be an effective way to counter the strong parasitic pressure inflicted by *Phytophthora* spp. on citrus. The results of this study can be applied in area with similar ecological parameters.

Acknowledgements The Cameroon Institute of Agricultural Research for Development (IRAD); The Centre International de

Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) through his incentive share for the financing of student's work; the CORAF projects "Optimizing productivity and perennial intercrop diversity Tradeoffs in West and Central African cocoa farms (Tradeoffs in cocoa)" and "Enhancing food security and well-being of rural African Households through Improved synergy between Agroforestry Systems and Food crops." That funded this work; the populations of Zima-Mbakomo, Ikata and Boyambassa villages. Especially to AMADAGANA Francois, Emmanuel and NGA Marcus.

References

- Beer J, Muschler R, Kass D, Somarriba E (1997) Shade management in coffee and cocoa plantations. *Agrofor Syst* 38(13):139–164
- Bowers JH, Sonoda RM, Mitchell DJ (1990) Path coefficient analysis of the effect of rainfall variables on the epidemiology of *Phytophthora* blight of pepper *Phytophthora capsici* caused by. *Phytopathology* 80:1439–1446
- Brown DH, Bolker BM (2004) The effects of disease dispersal and host clustering on the epidemic threshold in plants. *Bull Math Biol* 66(2):341–371
- Cacciola SO, Di San Lio GM (2008) Management of citrus diseases caused by *Phytophthora* spp. In: Ciancio A, Mukerji KG (eds) Integrated management of diseases caused by fungi, bacteria and Phytoplasma. Springer, Netherlands, pp 61–84
- Calonnec A, Burie JB, Langlais M, Guyader S, Saint-Jean S, Sache I, Tivoli B (2013) Impacts of plant growth and architecture on pathogen processes and their consequences for epidemic behaviour. *Eur J Plant Pathol* 135:479–497
- Dewdney MM, Timmer LW (2010) Citrus scab. In: Rogers ME, Dewdney MM, Spann TM (eds) Florida citrus pest management guide: University of Florida, IFAS, Doidge and Bottomley 1931, p 3
- Di San Lio MG (1994) Integrated management of bacterial and fungal diseases of citrus in the Mediterranean area. *Proc Int Soc Citrus Grow* 3:1273–1277
- Futch SH, Graham JH (2012) Field diagnosis and management of *Phytophthora* diseases, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville. <http://edis.ifas.ufl.edu>
- Gidoïn C (2013) Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer: la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun. Thèse de doctorat, Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques de Montpellier
- Gidoïn C, Babin R, Bagny Beilhe L, Cilas C, Ten Hoopen GM, Ngo Bieng MA (2014) Tree spatial structure, composition and host resource availability influenced mirid density of black pod prevalence in cocoa agroforests in Cameroon. *PLoS ONE* 9(10):e109405
- Goreaud F (2000) Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et à la modélisation des peuplements complexes., PhD thesis, L'ENGREF, Centre de Nancy, France

- Graham JH (1995) Root regeneration and tolerance of citrus rootstocks to root rot caused by *Phytophthora nicotianae*. *Phytopathology* 85:111–117
- Graham JH, Timmer LW (2006) *Phytophthora* diseases of citrus. University of Florida, IFAS Extension. <http://edis.ifas.ufl.edu/CH087>
- Hirst JM, Stedman OJ (1960) The epidemiology of *Phytophthora infestans*; the source of inoculum. *Ann Appl Biol* 48:489–517
- Kuate J (1998) Cercospora leaf and spot disease of citrus caused by *Phaeoramularia angolensis*. *Cah Agric* 7:121–129
- Kuate J, Manga Bella, Damesse F, Kouodiekong L, Ndindeng SA, David O, Parrot L (2006) Fruit trees cultivated in family farms in the humid area of Cameroon: a survey. *Fruits* 61(6):373–387
- Madden LV (1998) Rain-splash and spore dispersal a physical perspective. In: Jones DG (ed) *The epidemiology of plant diseases*. Kluwer, London, pp 348–370
- Mitchell EC, Tilman D, Groth JV (2002) Effects of grassland plant species diversity, abundance, composition and foliar fungal disease is. *Ecology* 83(6):1713–1726
- Ndo EGD (2007) Analyse du risque épidémiologique des populations d'agrumes vis à vis de la cercosporiose, du scab et de la gommose dans les zones humides du Cameroun. Thèse de MSc, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles Université de Dschang, Cameroun
- Ndo EGD, Bella-Manga F, Ndindeng SA, Ndoumbe-Nkeng M, Fontem AD, Cilas C (2010) Altitude, tree species and soil type are the main factors influencing the severity of *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus in the humid zones of Cameroon. *Eur J Plant Pathol* 128:385–397
- Neher D, Duniway JM (1992) Dispersal of *Phytophthora parasitica* in tomato fields by furrow irrigation. *Plant Dis* 76:582–586
- Ngo Bieng MA, Gidoin C, Avelino J, Cilas C, Deheuvels Wery J (2013) Diversity and spatial clustering of shade trees affect cacao yield and pathogen pressure in Costa Rican agroforests. *Basic Appl Ecol* 14:329–336
- Oro FZ, Bonnot F, Ngo-Bieng MA, Delaitre E, Dufour BP, Ametefe KE, Mississo E, Wegbe K, Muller E, Cilas C (2012) Spatiotemporal pattern analysis of Cacao swollen shoot virus in experimental plots in Togo. *Plant Pathol* 61(6):1043–1051
- Rao MR, Nair PKR, Ong CK (1998) Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agrofor Syst* 38:3–50
- Ratnadass A, Fernandes P, Avelino J, Habib R (2012) Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems. *Agrofor Sustain Dev* 32(1):273–303
- Shew HD (1987) Effect of host resistance is spread of *Phytophthora parasitica* var. Subsequent development and nicotianae of tobacco black shank under field conditions. *Phytopathology* 77:1090–1093
- Sonwa DJ, Nkongmeneck BA, Weise SF, Tchatat M, Adesina AA, Janssens MJJ (2007) Diversity of plants in cocoa agroforests in humid forest areas of Southern Cameroon. *Biodiv Conserv* 16:2385–2400
- Temple L (2001) Quantification of fruit production and vegetable trade in Cameroon. *Cah Agric* 10:87–94
- Zwankhuizen J, Govers F, Zadoks JC (1998) Development of potato late blight epidemics: disease foci, disease gradients, and infection sources. *Phytopathology* 88:754–763



DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES
DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

RAPPORT DE SOUTENANCE DE LA THESE DE Doctorat/Ph.D
De Monsieur AKOUTOU MVONDO Etienne, Matricule : 08S0018

Suite à l'autorisation N°23/00232/UYI/VREPDTIC/DAAC/DEPE/SPD/CB-AP du 25 septembre 2023 de Monsieur le Recteur de l'Université de Yaoundé I, Monsieur **AKOUTOU MVONDO Etienne**, Matricule **08S0018**, a soutenu publiquement ce mercredi 08 novembre 2023 à partir de 10 heures, dans la salle S01/S02 du Bloc Pédagogique de la Faculté des Sciences une Thèse de Doctorat/Ph.D en Biologie des Organismes Végétaux, option Biotechnologies Végétales sur le thème : « **Facteurs épidémiologiques et gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun** » devant le jury constitué ainsi qu'il suit :

Président : DJOCGOUÉ Pierre François, *Professeur*, Université de Yaoundé I
Rapporteurs : AMBANG Zachée, *Professeur*, Université de Yaoundé I
NDO Eunice Danièle, *Maître de Recherches*, IRAD
Membres : NDONGO BEKOLO, *Maître de Conférences*, Université de Yaoundé I
NYASSE Salomon, *Directeur de Recherches*, IRAD
NGONKEU MANGAPTCHE Eddy, *Maître de Conférences*, Université de Yaoundé I

Cette étude menée en laboratoire (IRAD) et en champs dans la grande zone de forêts humides du Cameroun s'inscrit dans un contexte de création d'un système de gestion intégrée pour lutter contre la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes. La situation épidémiologique de la gommose, l'effet des caractéristiques structurales des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (SAFC) sur l'intensité de la gommose ont été évalués. Par ailleurs, l'utilisation des souches de *Trichoderma asperellum* (PR11 et PR12) et des nanoparticules de nitrate d'argent (AgNP) à base d'extraits aqueux de *Tithonia diversifolia* s'est avérée comme alternative à la lutte chimique.

Il ressort de cette étude que *Phytophthora cinnamomi*, *P. citrophthora*, *P. nicotianae* et *P. palmivora* sont les espèces responsables de la gommose sur les agrumes dans la zone d'étude. L'ombrage dense et la structure spatiale régulière des agrumes au sein des SAFC atténuent significativement l'intensité de la gommose. La température, la pluviométrie, l'humidité du sol, l'humidité relative, les traitements insecticides/fongicides, l'argile, le limon fin et la matière organique du sol sont les facteurs de risque épidémiologique de la gommose. *T. asperellum* et les AgNP ont montré un fort potentiel d'inhibition de tous les isolats de *Phytophthora* inféodés aux agrumes et peuvent dès lors être considérés pour des travaux de formulation de bio fongicides contre la gommose. La prise en compte des spécificités environnementales est un prérequis capital pour l'implantation des vergers agrumicoles. La production des agrumes dans des systèmes diversifiés représente également une voie à privilégier pour une régulation écologique de la gommose. La mise au point de biopesticides représente également une opportunité dans notre contexte national, car elle permettrait une gestion économique et écologique des bioagresseurs.

Dans un exposé clair, didactique, fait en vidéo-projection en 40 min, le candidat a présenté les principaux résultats de ses travaux et a donné des réponses satisfaisantes aux questions des différents membres du jury, montrant ainsi la parfaite maîtrise de son sujet.

Le jury après avoir délibéré, accepte à l'unanimité la Thèse présentée et décerne à Monsieur **AKOUTOU MVONDO Etienne** le titre de **Docteur/Ph.D** en Biologie des Organismes Végétaux, option Biotechnologies Végétales, Spécialité Phytopathologie, avec la mention « **TRES HONABLE** ».

Fait à Yaoundé, le 08 Novembre 2023

Président

Rapporteurs

Membres

P.F. DJOCGOUÉ

NDO Eunice

P.A. MBANG

NDONGO BEKOLO

NYASSE Salomon

NGONKEU M.A.I.

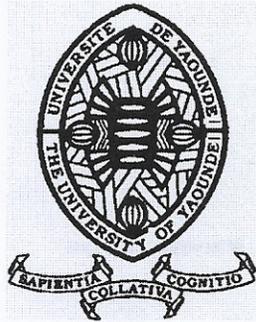
REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
B.P 337 Tel/Fax : 22 22 13 20
Email : uyi@uycdc.uninet.cm

DIRECTION DES AFFAIRES ACADEMIQUES
ET DE LA COOPERATION

Division de l'Enseignement et des Personnels
Enseignants

Service des Programmes et des Diplômes



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

DEPARTMENT OF ACADEMIC AFFAIRS AND
COOPERATION

P.O. Box 337 Tel/Fax: 22 22 13 20
Email: uyi@uycdc.uninet.cm

Sub-Department of Teaching and Teaching Staff

Programs and Certification Service

N° 23 / 00 232 /UYI/VREPDTIC/DAAC/DEPE/SPD

26 OCT 2023

COMMUNIQUÉ

Le Recteur de l'Université de Yaoundé I informe le public que **Monsieur AKOUTOU MVONDO Etienne**, Matricule **08S0018**, soutiendra le **jeudi 09 novembre 2023 à 10H heures** très précises à la salle **Multimédia** de la Faculté des Sciences, une thèse de Doctorat/PhD en Biologie et Physiologie Végétales intitulée : «**Facteurs épidémiologiques et gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun**».

L'intéressé comparaitra devant un jury constitué ainsi qu'il suit:

<u>Président :</u>	DJOCGOUE Pierre Francois, Pr ;	Université de Yaoundé I ;
<u>Rapporteurs:</u>	AMBANG Zachée, Pr ;	Université de Yaoundé I ;
	NDO Eunice Danièle, Maître de Recherches;	Institut de Recherches Agricole pour le Développement, Yaoundé ;
<u>Membres :</u>	NDONGO BEKOLO, MC;	Université de Yaoundé I ;
	NYASSE Salomon, Directeur de Recherche ;	Institut de Recherches Agricole pour le Développement, Yaoundé ;
	NGONKEU MANGAPTCHÉ Eddy, MC ;	Université de Yaoundé I.

N.B. Le port de la toge est exigé pour les membres du jury.

LE RECTEUR DE L'UNIVERSITE DE YAOUNDE I

Ampliations :

- Doyen FS
- CD- BPV
- Affichage/Info du public
- Intéressé
- Chrono/Archives



J. Meka née Ngo Um Esther



DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES
DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

RAPPORT DU CONSEIL DU DEPARTEMENT EN SA SESSION DU JEUDI
16 MARS 2023 RELATIF AUX TRAVAUX DE FIN DE RECHERCHE EN
THESE DE DOCTORAT/Ph.D DE M. AKOUTOU MVONDO ETIENNE,
DOCTORANT AU DBPV

Réuni en sa session du jeudi 16 mars 2023, le conseil du Département de Biologie et Physiologie Végétales a examiné parmi les points inscrits à l'ordre du jour le rapport de fin des travaux de la thèse de M. AKOUTOU MVONDO Etienne inscrit pour la préparation du Doctorat/Ph.D depuis l'année 2016-2017, sous le Co-Encadrement du Pr AMBANG Zachée et du Dr NDO Eunice Gilda (MR, IRAD). Les travaux ont porté sur le thème « Facteurs épidémiologiques et gestion intégrée de la gommose à *Phytophthora* sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun ».

L'objectif général du travail était d'identifier les principaux facteurs de risque épidémiologique de la gommose sur les agrumes permettant de mettre au point une stratégie de gestion intégrée. De manière spécifique, l'étude visait à : (i) décrire la situation épidémiologique de la gommose sur les agrumes dans les zones de forêts humides du Cameroun ; (ii) évaluer l'effet des caractéristiques structurales du système agroforestier à base de cacaoyers sur l'intensité de la gommose; (iii) déterminer les facteurs de risque épidémiologique de la gommose sur les principales espèces d'agrumes produites au Cameroun et (iv) tester *in vitro* le potentiel fongicide des souches de *Trichoderma asperellum* et des nanoparticules de nitrate d'argent à base d'extraits aqueux de *Tithonia diversifolia* sur les espèces de *Phytophthora* inféodées aux agrumes.

La méthodologie a été bien menée, et les résultats obtenus ont permis de mettre en lumière l'importance de la gommose des agrumes causée par les *Phytophthora* dans les zones de forêts humides du Cameroun. *P. citrophthora*, *P. nicotianae*, *P. palmivora*, et *P. cinnamomi* sont les espèces inféodées aux agrumes dans la zone d'étude. La température, l'humidité relative et la pluviométrie se sont révélées comme les variables climatiques déterminant le développement de la gommose. Les résultats ont montré une forte croissance des souches de *T. asperellum* par rapport aux agents pathogènes, témoignant de l'inhibition de la croissance des agents pathogènes par les souches antagonistes. Pour les tests de bio-efficacité des AgNPs sur les espèces de *Phytophthora*, les résultats ont montré une réduction significative de la croissance mycélienne des espèces de *Phytophthora* avec des nanoparticules de nitrate d'argent par rapport au fongicide de référence et à l'extrait aqueux de *T. diversifolia*. Ces agents de lutte pourraient être considérés pour des travaux approfondis en guise de formulation de biopesticides contre les *Phytophthora*.

Le Département donne quittance à la suite du processus et a entériné la proposition du Jury de Présoutenance et des experts proposés par l'équipe d'encadrement et rassure que les travaux de M. AKOUTOU peuvent être soutenus publiquement devant un jury composé comme suit :

Président : DJOCGOUE Pierre François, Professeur, Université de Yaoundé I

Rapporteurs : AMBANG Zachée, Professeur, Université de Yaoundé I
NDO Eunice Golda Danièle, Maître de Recherche, IRAD

Examineurs : NDONGO BEKOLO, Maître de Conférences, Université de Yaoundé I
NGONKEU MAGAPCHE Eddy Léonard, Maître de Conférences, Université Yaoundé I
NYASSE Salomon, Directeur de Recherche, IRAD

Fait à Yaoundé le 27 JUN 2023



Le Chef de Département

Professeur