

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET

PHYSIOLOGIE VEGETALES



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PLANT

BIOLOGY

Equations allométriques et estimation de la biomasse forestière dans les forêts denses tropicales de la Région de l'Est Cameroun

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

Par : **CHIMI DJOMO Cédric**
Master ès Sciences

Sous la direction de
DJOMO NJEPANG Adrien
Professeur Adjoint
Université Queen's (Canada)
ZAPFACK Louis
Maître de Conférences
Université de Yaoundé 1 (Cameroun)

Année Académique : 2018





DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES
DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

ATTESTATION DE CORRECTION

Nous soussignés, membres du Jury de soutenance de la thèse de Doctorat/Ph.D en Biologie des Organismes Végétaux option Botanique-Ecologie de l'étudiant **CHIMI DJOMO Cédric**, Matricule **0850061**, soutenue publiquement le 05 Juillet 2018 sur le sujet «**Equations allométriques et estimation de la biomasse forestière dans les forêts denses tropicales de la région de l'Est Cameroun**» attestons que les corrections conformément aux remarques et recommandations du jury lors de la soutenance de la dite thèse de Doctorat/Ph.D ont été effectuées par le candidat.

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

ZAPFACK Louis
Maître de Conférences

Rapporteurs

DJOMO NJEPANG Adrien
Assistant Professor

Membres

BELL Joseph Martin
Professeur

NGUETSOP Victor François
Maître de Conférences

Augustine GENLA NWANA Epouse FONGOD
Maître de Conférences

Président

YOUNBI Emmanuel
Professeur

**LISTE PROTOCOLAIRE DE LA FACULTE DES SCIENCES PAR
DEPARTEMENT ET PAR GRADE**

UNIVERSITE DE YAOUNDE I FACULTE DES SCIENCES Division de la Programmation et du Suivi des Activités Académiques		The University of Yaoundé I Faculty of Science Division of Programming and follow-up of Academic Affairs
LISTE DES ENSEIGNANTS PERMANENTS	LIST OF PERMENENT TEACHING STAFF	

ANNEE ACADEMIQUE 2017/2018 (Par Département et par Grade)

DATE D'ACTUALISATION : Février 2018

ADMINISTRATION

DOYEN : AWONO ONANA Charles, Professeur

VICE-DOYEN / DPSAA : DONGO Etienne, Professeur

VICE-DOYEN / DSSE : OBEN Julius ENYONG, Professeur

VICE-DOYEN / DRC : MBAZE MEVA'A Luc Léonard, Maître de Conférences

Chef Division Affaires Académiques, Scolarité et Recherche : ABOSSOLO Monique,
Maître de Conférences

Chef Division Administrative et Financière : NDOYE FOE Marie C.F., Maître de
Conférences

1- DEPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (40)

N°	NOMS ET PRENOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1	BENG née NINTCHOM PENLAP V.	Professeur	En poste
2	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
3	MBACHAM Wilfried	Professeur	<i>Chef Dpt/FMSB</i>
4	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	Chef de Département
5	OBEN Julius ENYONG	Professeur	<i>Vice-Doyen DSSE/Coord. CRFD- STG</i>
6	ATOGHO Barbara Mma	Maître de Conférences	En poste
7	BELINGA née NDOYE FOE Marie C. Florentine	Maître de Conférences	Chef DAF / FS
8	BIGOGA DIAGA Jude	Maître de Conférences	En poste
9	BOUDJEKO Thaddée	Maître de Conférences	En poste
10	EFFA ONOMO Pierre	Maître de Conférences	En poste
11	FOKOU Elie	Maître de Conférences	En poste
12	KANSCI Germain	Maître de Conférences	En poste
13	MINKA Samuel	Maître de Conférences	En poste
14	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
15	NGUEFACK Julienne	Maître de Conférences	En poste
16	NJAYOU Frédéric Nico	Maître de Conférences	En poste
17	WAKAM née NANA Louise	Maître de Conférences	En poste
18	ACHU Merci BIH	Chargé de Cours	En poste
19	BEBOY EDJENGUELE Sara Nathalie	Chargé de Cours	En poste
20	DAKOLE DABOY Charles	Chargé de Cours	En poste
21	DEMMANO Gustave	Chargé de Cours	En poste

22	DJOKAM TAMO Rosine	Chargé de Cours	En poste
23	DJUIDJE NGOUNOUE Marcelline	Chargé de Cours	En poste
24	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Chargé de Cours	En poste
25	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Chargé de Cours	En poste
26	EVEHE BEBANDOUE Marie – Solange	Chargé de Cours	<i>En disponibilité</i>
27	EWANE Cécile Anne	Chargé de Cours	En poste
38	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
29	KOTUE TAPTUE Charles	Chargé de Cours	En poste
30	MANANGA Marlyse Joséphine	Chargé de Cours	En poste
31	MBONG ANGIE MOUGANDE Mary Ann	Chargé de Cours	En poste
32	MOFOR née TEUGWA Clauilde	Chargé de Cours	<i>IA4/MINESUP</i>
33	Palmer MASUMBE NETONGO	Chargé de Cours	En poste
34	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Chargé de Cours	En poste
36	AKINDEH MBUH NJI	Assistant	En poste
36	BEBEE FADIMATOU	Assistant	En poste
37	LUNGA Paul KAILAH	Assistant	En poste
38	MBOUCHE FANMOE Marcelline Joëlle	Assistant	En poste
39	PECHANGOU NSANGOU Sylvain	Assistant	En poste
40	TIENTCHEU DJOKAM Léopold	Assistant	En poste
2- DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (B.P.A.) (44)			
1	BILONG BILONG Charles Félix	Professeur	Chef de Département
2	DIMO Théophile	Professeur	En poste
3	DJIETO Lordon Champlain	Professeur	En poste
4	ESSOMBA née NTSAMA MBALLA	Professeur	<i>VDRC/Chef dépt FMSB</i>
5	FOMENA Abraham	Professeur	En poste
6	KAMTCHOUING Pierre	Professeur	En poste
7	MIMPFOUNDI REMY	Professeur	En poste
8	NJAMEN Dieudonné	Professeur	En poste
9	NJIOKOU Flobert	Professeur	En poste
10	NOLA Moïse	Professeur	En poste
11	TAN Paul Vernyuy	Professeur	En poste
12	TCHUEM TCHUENTE Louis	Professeur	<i>Coord. Progr. MINSANTE</i>
13	AJEAGAH Gidéon AGHAINDOUM	Maître de Conférences	<i>C.S. D.P.E.R</i>
14	DZEUFJET DJOMENI Paul Désiré	Maître de Conférences	En poste
15	FOTO MENBOHAN Samuel	Maître de Conférences	<i>CT2 MIN. ENERGIE</i>
16	KAMGANG René	Maître de Conférences	<i>C.E. MINRESI</i>
17	KEKEUNOU Sévilor	Maître de Conférences	En poste
18	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
19	MONY NTONE Ruth	Maître de Conférences	En poste
21	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste
22	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Maître de Conférences	En poste
23	ALENE Désirée Chantal	Chargé de Cours	En poste
24	ATSAMO Albert Donatien	Chargé de Cours	En poste
25	BELLET EDIMO Oscar Roger	Chargé de Cours	En poste
26	BILANDA Danielle Claude	Chargé de Cours	En poste

27	DJIOGUE Séfirin	Chargé de Cours	En poste
28	GOUNOUE KAMKUMO Raceline	Chargé de Cours	En poste
29	JATSA MEGAPTCHE Hermine	Chargé de Cours	En poste
30	LEKEUFACK FOLEFACK Guy Benoît	Chargé de Cours	En poste
31	MAHOB Raymond Joseph	Chargé de Cours	En poste
32	MBENOUN MASSE Paul Serge	Chargé de Cours	En poste
33	METCHI DONGFACK Mireille Flore	Chargé de Cours	En poste
34	MOUGANG NGAMENI Luciane	Chargé de Cours	En poste
35	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Chargé de Cours	En poste
36	NGOULATEU KENFACK Omer BEBE	Chargé de Cours	En poste
37	NGUEGUIM TSOFACK Florence	Chargé de Cours	En poste
38	NGUEMBOCK	Chargé de Cours	En poste
39	NJUA Clarisse YAFI	Chargé de Cours	En poste
40	NOAH E. O. Vivien	Chargé de Cours	En poste
41	TADU Zéphirin	Chargé de Cours	En poste
42	YEDE	Chargé de Cours	En poste
43	ETEME ENAMA Serge	Assistant	En poste
44	KANDEDA KAVAYE Antoine	Assistant	En poste
45	KOGA MANG'Dobara	Assistant	En poste
3-DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES (B. P. V.) (27)			
1	AMBANG Zachée	Professeur	CDAASR/FSEG-UYII
2	BELL Joseph Martin	Professeur	En poste
3	MOSSEBO Dominique Claude	Professeur	En poste
4	YOUMBI Emmanuel	Professeur	Chef de Département
5	BIYE Elvire Hortense	Maître de Conférences	En poste
6	DJOCGOUE Pierre François	Maître de Conférences	En poste
7	KENGNE NOUMSI Ives Magloire	Maître de Conférences	En poste
8	MALLA Armand William	Maître de Conférences	En poste
9	MBARGA BINDZI Marie Alain.	Maître de Conférences	<i>CT/UDs</i>
10	MBOLO Marie.	Maître de Conférences	<i>CTP-C2D-PSFE2 MINFOF</i>
11	NDONGO BEKOLO	Maître de Conférences	<i>CE / MINRESI</i>
12	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy Léonard	Maître de Conférences	En poste
13	ZAPFACK Louis	Maître de Conférences	En poste
14	ANGONI Hyacinthe	Chargé de Cours	En poste
15	GONMADGE Christelle	Chargé de Cours	En poste
16	MAHBOU SOMO TOUKAM Gabriel	Chargé de Cours	En poste
17	NGALLE Hermine BILLE	Chargé de Cours	En poste
18	NGODO MELINGUI Jean Baptiste	Chargé de Cours	En poste
19	NGOOU Lucas Vincent	Chargé de Cours	En poste
20	NSOM ZAMO Annie Claude ép. Pial	Chargé de Cours	<i>Expert national./UNESCO</i>
21	ONANA Jean Michel	Chargé de Cours	En poste
22	TONFACK Libert Brice	Chargé de Cours	En poste
23	TSOATA Esaïe	Chargé de Cours	En poste
24	DJEUANI Astride Carole	Assistant	En poste
25	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Assistant	En poste

26	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Assistant	En poste
27	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Assistant	En poste
4-DEPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (C.I.) (35)			
1	AGWARA ONDOH Moïse	Professeur	<i>Insp Génér. MINPMEA</i>
2	ELIMBI Antoine	Professeur	En poste
3	GHOGOMU Paul MINGO	Professeur	<i>Directeur Cabinet PM</i>
4	KETCHA MBADCAM Joseph	Professeur	Chef de Département
5	LAMINSI Samuel	Professeur	En poste
6	MELO née CHINJE Uphie F.	Professeur	<i>Recteur UN</i>
7	NANSEU Charles Péguy	Professeur	En poste
8	NENWA Justin	Professeur	En poste
9	NDIFON Peter TEKE	Professeur	<i>CT MINRESI</i>
10	NGAMENI Emmanuel	Professeur	<i>Doyen/ UDS</i>
11	BABALE DJAM DOUDOU	Maître de Conférences	En poste
12	DJOUFAC WOUMFO Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
13	KONG SAKEO	Maître de Conférences	En poste
14	NDIKONTAR Maurice KOR	Maître de Conférences	<i>Vice-Doyen/Ubda</i>
15	NGOMO Horace MANGA	Maître de Conférences	<i>S.G. MINESUP/Recteur UB</i>
16	YOUNANG Elie	Maître de Conférences	En poste
17	ACAYANKA Elie	Chargé de Cours	En poste
18	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Chargé de Cours	En poste
19	CHEUMANI YONA Arnaud	Chargé de Cours	En poste
20	EMADACK Alphonse	Chargé de Cours	En poste
21	GWET Simon – Pierre	Chargé de Cours	En poste
22	KAMGANG YOUNBI Georges	Chargé de Cours	En poste
23	KEUMEGNE MBOUGUEM Jean Claude	Chargé de Cours	En poste
24	KENNE DEDZO Gustave	Chargé de Cours	En poste
25	KOUOTOU DAOUDA	Chargé de Cours	En poste
26	MAKON Thomas Beauregar	Chargé de Cours	En poste
27	MBEY Jean Aimé	Chargé de Cours	En poste
28	NDI Julius NSAMI	Chargé de Cours	En poste
29	NDOSIRI Bridget NDOYE	Chargé de Cours	En poste
30	NJIOMOU Chantale épouse DJANGANG	Chargé de Cours	En poste
31	NJOYA Dayirou	Chargé de Cours	En poste
32	NYAMEN Linda Dyorisse	Chargé de Cours	En poste
33	PABOUDAM GBAMBIE Awaou	Chargé de Cours	En poste
34	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Chargé de Cours	En poste
35	NCHIMI NONO Katia	Assistant	En poste
5-DEPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (C.O.) (33)			
1	DONGO Etienne	Professeur	Vice-Doyen/ DPSAA
2	GHOGOMU TIH ROBERT RALPH	Professeur	<i>Directeur I.B.A. Foumban</i>
3	MBAFOR Joseph	Professeur	En poste
4	NGADJUI TCHALEU B.	Professeur	<i>Chef de dépt. FMBS</i>
5	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	<i>Chef de dépt. UDs</i>
6	NKENGFACK Augustin Ephraïm	Professeur	Chef de Département
7	NYASSE Barthélemy	Professeur	<i>Vice- Recteur UBda</i>

8	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	<i>Directeur au MINESUP</i>
9	WANDJI Jean	Professeur	En poste
10	Alex de Théodore ATCHADE	Maître de Conférences	<i>CD Rectorat</i>
11	FOLEFOC Gabriel NGOSONG	Maître de Conférences	En poste
12	KEUMEDJIO Félix	Maître de Conférences	En poste
13	KOUAM Jacques	Maître de Conférences	En poste
14	MBAZOA née DJAMA Céline	Maître de Conférences	En poste
15	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	En poste
16	MKOUNGA Pierre	Maître de Conférences	En poste
17	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
18	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
19	TCHOUANKEU Jean-Claude	Maître de Conférences	<i>C.T. UYII</i>
20	TCHUENDEM KENMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
21	TIH née NGO BILONG E. Anastasie	Maître de Conférences	En poste
22	YANKEP Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
23	AMBASSA Pantaleon	Chargé de Cours	En poste
24	EYONG Kenneth OBEN	Chargé de Cours	En poste
25	FOTSO WABO Ghislain	Chargé de Cours	En poste
26	KAMTO Eutrophe Ledoux	Chargé de Cours	En poste
27	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Chargé de Cours	En poste
28	NOTE LOUGBOT Olivier	Chargé de Cours	En poste
29	OUAHOUE WACHE Blandine Marlyse	Chargé de Cours	En poste
30	TAGATSING FOTSING Maurice	Chargé de Cours	En poste
31	ZONDEGOUNBA Ernestine	Chargé de Cours	En poste
32	NGINTEDO Dominique	Assistant	En poste
33	NGOMO Orléans	Assistant	En poste
6-DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (30)			
1	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	Chef de Département
2	FOTSO Pauline Laure	Professeur	<i>Député à l'Assemblée Nationale</i>
3	FOUDA NDJODO Marcel	Professeur	<i>IGA-MINESUP/Chef Dépt. ENS</i>
4	TCHUENTE Maurice	Professeur	PCA UB
5	NDOUNDAM René	Maître de Conférences	En poste
6	AMINOUE Halilou	Chargé de Cours	En poste
7	CHEDOM FOTSO Donatien	Chargé de Cours	En poste
8	DJAM Xaviera Youth KIMBI	Chargé de Cours	En poste
9	KOUOKAM KOUOKAM Etienne Appolin	Chargé de Cours	En poste
10	MELATAGIA YONTA Paulin	Chargé de Cours	En poste
11	MOTO MPONG Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
12	TAPAMO KENFACK Hyppolite	Chargé de Cours	En poste
13	TINDO Gilbert	Chargé de Cours	En poste
14	TSOPZE Norbert	Chargé de Cours	En poste
15	WAKU KOUAMOU Jules	Chargé de Cours	En poste
16	ABESSOLO ALO'O Gislain	Assistant	En poste
17	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste

18	DOMGA KOMGUEM Rodrigue	Assistant	En poste
19	EBELE Serge	Assistant	En poste
20	HAMZA Adamou	Assistant	En poste
21	KAMDEM KENGNE Christiane	Assistant	En poste
22	KAMGUEU Patrick Olivier	Assistant	En poste
23	JIOMEKONG AZANZI Fidel	Assistant	En poste
24	MAKEMBE S. Fritz Oswald	Assistant	En poste
25	MEYEMDOU Nadège Sylvianne	Assistant	En poste
26	MONTHÉ DJIADEU Valéry Martial	Assistant	En poste
27	NKONDOCK MI BAHANACK Nicolas	Assistant	En poste
28	OLE OLE David Claude	Assistant	En poste
7-DEPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (32)			
1	BEKOLLE David	Professeur	<i>Vice-Recteur UN</i>
2	BITJONG NDOMBOL	Professeur	<i>DAAC UY I</i>
3	DOSSA COSSY Marcel	Professeur	En poste
4	AYISSI Raoul Domingo	Maître de Conférences	Chef de Département
5	EMVUDU WONO Yves S.	Maître de Conférences	<i>Chef Division MINESUP</i>
6	NKUIMI JUGNIA Célestin	Maître de Conférences	En poste
7	NOUNDJEU Pierre	Maître de Conférences	En poste
8	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	En poste
9	BOGSO Antoine M	Chargé de Cours	En poste
10	CHENDJOU Gilbert	Chargé de Cours	En poste
11	DOUANLA YONTA Hermann	Chargé de Cours	En poste
12	FOMEKONG Christophe	Chargé de Cours	En poste
13	KIANPI Maurice	Chargé de Cours	En poste
14	KIKI Maxime Armand	Chargé de Cours	En poste
15	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
16	MBANG Joseph	Chargé de Cours	En poste
17	MBEHOU Mohamed	Chargé de Cours	En poste
18	MBELE BEDIMA Martin	Chargé de Cours	En poste
19	MENGUE MENGUE David Joe	Chargé de Cours	En poste
20	NGUEFACK Bertrand	Chargé de Cours	En poste
21	NGUIMTSA Charles	Chargé de Cours	En poste
22	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
23	TAKAM SOH Patrice	Chargé de Cours	En poste
24	TETSADJIO TCHILEPECK Mesmin Erick	Chargé de Cours	En poste
25	TCHANGANG Roger Duclos	Chargé de Cours	En poste
26	TCHOUNDJA Edgar Landry	Chargé de Cours	En poste
27	TIAYA TSAGUE N. Anne- Marie	Chargé de Cours	En poste
28	DJIADEU NGAHA Michel	Assistant	En poste
29	MBIAKOP Hilaire George	Assistant	En poste
30	NIMPA PEFOUKEU Romain	Assistant	En poste
31	TANG AHANDA Barnabé	Assistant	<i>Chef Serv. MINPLAMAT</i>
8-DEPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MB) (13)			
1	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	<i>Chef de Division recherche IMPM</i>

2	ETOA François-Xavier	Professeur	Recteur UD/ Chef de Département
3	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste
4	NYEGUE Maximilienne Ascension	Maître de Conférences	En poste
5	NWAGA Dieudonné M.	Maître de Conférences	En poste
6	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
7	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Maître de Conférences	En poste
8	BODA Maurice	Chargé de Cours	En poste
9	BOUGNOM Blaise Pascal	Chargé de Cours	En poste
10	ENO Anna Arey	Chargé de Cours	En poste
11	ESSONO OBOUGOU Germain Gabriel	Chargé de Cours	En poste
12	TCHIKOUA Roger	Chargé de Cours	En poste
13	NJIKI BIKOÏ Jacky	Chargé de Cours	En poste
9-DEPARTEMENT DE PHYSIQUE (PH) (41)			
1	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
2	KOFANE Timoléon Crépin	Professeur	En poste
3	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	Chef de Département
4	NJOMO Donatien	Professeur	En poste
5	PEMHA Elkana	Professeur	En poste
6	TABOD Charles TABOD	Professeur	<i>Doyen/Ubda</i>
7	TCHAWOUA Clément	Professeur	En poste
8	WOAFO Paul	Professeur	En poste
9	BIYA MOTTO Frédéric	Maître de Conférences	<i>Dir. Gén. B. MEKIM</i>
10	BEN- BOLIE Germain Hubert	Maître de Conférences	En poste
11	DJUIDJE KENMOE Gemaine épouse ALOYEM KAZE	Maître de Conférences	En poste
12	EKOBENA FOU DA Henri Paul	Maître de Conférences	<i>Chef Dépt. UN</i>
13	EYEBE FOU DA Jean Sire	Maître de Conférences	En poste
14	FEWO Serge Ibraïd	Maître de Conférences	En poste
15	HONA Jacques	Maître de Conférences	En poste
16	MBANE BIOUELE	Maître de Conférences	En poste
17	NANA NBENDJO Blaise	Maître de Conférences	En poste
18	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Maître de Conférences	<i>Chef Serv. MINRESI</i>
19	NOUAYOU Robert	Maître de Conférences	En poste
20	OUMAROU BOUBA	Maître de Conférences	En poste
21	SAIDOU	Maître de Conférences	En poste
22	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
23	SIMO Elie	Maître de Conférences	En poste
24	ZEKENG Serge Sylvain	Maître de Conférences	En poste
25	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En Poste
26	BODO Bernard	Chargé de Cours	En poste
27	ENYEGUE A NYAM Françoise épouse BELINGA	Chargé de Cours	En poste
28	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste
29	FOUEDJIO David	Chargé de Cours	En poste
30	MBINACK Clément	Chargé de Cours	En poste
31	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Chargé de Cours	En poste
32	MVOGO Alain	Chargé de Cours	En poste
33	NDOP Joseph	Chargé de Cours	En poste

34	OBOUNOU Marcel	Chargé de Cours	<i>Dir.acad/Univ.Int.Etat Cam-Congo</i>
35	TABI Conrad Bertrand	Chargé de Cours	En poste
36	TCHOFFO Fidèle	Chargé de Cours	En poste
37	VONDOU DERBETINI Appolinaire	Chargé de Cours	En poste
38	WAKATA née BEYA Annie	Chargé de Cours	<i>Chef Serv. MINESUP</i>
39	WOULACHE Rosalie Laure	Chargé de Cours	En poste
40	CHAMANI Roméo	Assistant	En Poste
41	MEL'I Jorelle Larissa	Assistant	En Poste
10- DEPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (S.T.) (43)			
1	BITOM Dieudonné Lucien	Professeur	<i>Doyen / UN</i>
2	KAMGANG Pierre	Professeur	En poste
3	MEDJO EKO Robert	Professeur	<i>Dir/IUT Bois Mbalmayo</i>
4	NDJIGUI Paul-Désiré	Professeur	Chef de Département
5	NZENTI Jean-Paul	Professeur	En poste
6	ABOSSOLO née ANGUE Monique	Maître de Conférences	Chef DAASR
7	FOUATEU Rose épouse YONGUE	Maître de Conférences	En poste
8	GHOGOMU Richard TANWI	Maître de Conférences	<i>Chef de Dépt. IMIP/Maroua</i>
9	MOUNDI Amidou	Maître de Conférences	<i>CT/MINMIDT</i>
10	NDAM NGOUPAYOU Jules-Remy	Maître de Conférences	En poste
11	NGOS III Simon	Maître de Conférences	<i>D.A.A.C./UM</i>
12	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
13	NKOUMBOU Charles	Maître de Conférences	En poste
14	ONANA Vincent	Maître de Conférences	En poste
15	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
16	TEMDJIM Robert	Maître de Conférences	En poste
17	YENE ATANGANA Joseph Q.	Maître de Conférences	<i>Chef Cellule MINTP</i>
18	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	<i>S.G. MINTP</i>
19	BEKOA Etienne	Chargé de Cours	<i>Barage Memve'ele</i>
20	BISSO Dieudonné	Chargé de Cours	<i>Directeur Projet Barage Memve'ele</i>
21	EKOMANE Emile	Chargé de Cours	<i>Délégué Régional/MINMIDT</i>
22	ESSONO Jean	Chargé de Cours	<i>En poste</i>
23	EYONG John TAKEM	Chargé de Cours	<i>En poste</i>
24	FUH Calistus Gentry	Chargé de Cours	<i>En poste</i>
25	GANNO Sylvestre	Chargé de Cours	<i>En poste</i>
26	LAMILEN BILLA Daniel	Chargé de Cours	En poste
27	MBIDA YEM	Chargé de Cours	<i>CS/LABOGENIE</i>
28	MINYEM Dieudonné	Chargé de Cours	<i>Chef de Dépt. IMIP/Maroua</i>
29	MOUAFO Lucas	Chargé de Cours	En poste
30	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargé de Cours	En poste
31	NGO BIDJECK Louise Marie	Chargé de Cours	En poste
32	NGUEUTCHOUA Gabriel	Chargé de Cours	<i>CEA MINRESI</i>
33	NJOM Bernard de Lattre	Chargé de Cours	En poste
34	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
35	NYECK Bruno	Chargé de Cours	En poste

36	TCHAKOUNTE NUMBEM	Jacqueline	ép.	Chargé de Cours	<i>CEA MINRESI</i>
37	TCHAPTCHET Pesquidoux I	TCHATO	De	Chargé de Cours	En poste
38	TEHNA Nathanaël			Chargé de Cours	<i>CS/ MINMIDT</i>
39	TEMGA Jean Pierre			Chargé de Cours	En poste
40	SABABA Elisé			Chargé de Cours	En poste
41	ANABA ONANA Achille Basile			Assistant	En poste
42	BINELI BETSI Thierry Olivier			Assistant	En poste
43	METANG Victor			Assistant	En poste

Répartition chiffrée des enseignants permanents par Département

Département	Nombre d'enseignants				
	Pr	MC	CC	ASS	Total
BC	5 (1)	12 (5)	17 (9)	6 (2)	40 (17)
BPA	11 (1)	9 (3)	20 (8)	3 (0)	43 (12)
BPV	4 (0)	9 (2)	10 (3)	4 (4)	27 (9)
C.I.	10 (1)	6 (0)	18 (4)	1 (1)	35 (6)
C.O.	9 (0)	13 (4)	10 (2)	2 (0)	34 (6)
IN	4 (1)	1 (0)	10 (0)	13 (2)	28 (3)
MA	3 (0)	4 (0)	20 (1)	4(0)	31 (1)
MB	2 (0)	5 (1)	6 (2)	0 (0)	13 (3)
PH	8 (0)	16 (1)	15 (4)	2 (1)	41 (6)
ST	5 (0)	13 (2)	22 (3)	3 (0)	43 (5)
Total	61 (4)	88 (18)	148 (36)	38 (10)	335 (68)

Soit un total de 335 (68) dont :

- Professeurs 61 (4)
 - Maîtres de Conférences 88 (18)
 - Chargés de Cours 148 (36)
 - Assistants 38 (10)
- () = Nombre de femmes

DEDICACE

Je dédie ce travail à mes parents :

- M. Athanase DJOMO ;
- Mme DJOMO née Jeannette KONGUEP.

Afin qu'ils puissent y trouver une source de satisfaction pour l'esprit d'endurance qu'ils ont toujours su cultiver en moi.

REMERCIEMENTS

Ce travail s'est réalisé grâce aux efforts multiples de plusieurs personnes dont l'apport a été capital dans son aboutissement. Je voudrais ici leur témoigner mes sincères remerciements.

A Louis Zapfack, Maître de Conférences au Département de Biologie et Physiologie Végétales (DBPV) de l'Université de Yaoundé 1, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche depuis le cycle de Master. Son encadrement, sa rigueur scientifique et son initiation à la recherche m'ont permis de surmonter bien des situations. Malgré, ses multiples occupations, il a toujours été prompt à écouter, critiquer et conseiller. Merci pour ta confiance, tes précieux conseils et les nombreuses relectures de ce document.

A Adrien Njepang Djomo, Professeur Adjoint à l'Université Queen's (Canada) et co-encadreur de ce travail. C'est par lui que j'ai intégré le projet « Quantifying the impact of forest management practices on carbon storage in forest ecosystems in Africa: Implications for the development of REDD+ initiatives in the Congo Basin » lequel m'a permis de collecter les données de terrain. Il a suivi méticuleusement ce travail. Ses remarques pertinentes lors de nos nombreuses discussions ont considérablement aidé à forger les idées développées dans ce travail. Merci également pour les innombrables relectures de ce document, des articles préparés ainsi que les précieux conseils prodigués.

A Emmanuel Youmbi, Professeur, Chef de DBPV pour sa diligence administrative.

A tout le personnel enseignant du DBPV, pour leur dévotion sans relâche à assurer notre formation académique depuis notre entrée à l'université.

A tous les membres du laboratoire de « Queen's Facility for Isotope Research » de l'Université Queen's du Canada, pour l'assistance et l'encadrement durant les travaux des quantifications des teneurs en carbone des échantillons d'arbres.

A Neal Scott, Professeur à l'Université Queen's du Canada, pour son accueil chaleureux durant la réalisation des analyses de données. Merci à tous les membres de ce laboratoire pour l'ambiance harmonieuse développée durant mon séjour.

Aux membres du jury qui examineront ce travail afin que leurs remarques et suggestions puissent contribuer à améliorer la qualité de ce document.

Nous sommes aussi redevable envers « La Côtère Forestière » qui en plus d'avoir accepté cette étude, nous ont fourni la logistique nécessaire sur le terrain. Je pense aussi à tous les guides qui nous ont accompagnés en forêt lors de nos missions de terrain.

A mes compagnons d'étude et amis Jules Christian Zekeng, Laurent Menyene, Hubert Kpoumie, Glwadys Meyan-ya, Amandine Ntonmen, Dr. Nadège Madountsap, Marlène Ngansop, Forbi Preasius, Mounpoubeuyi, Sandrine Mayogo, Gyslain 2 Mofack, Donatien Zebaze, Patrick Ngatsi, Mireil Tchoupou, Laure Blandine Signe, Guylène Ngoukwa, Alex Nguenang, Lyrette Fogang, Vicompte André Ndoudoumou, Gervais Ndiffo, Martial Tabakam, Landry Fodjo, Olivia Manezeu, Pierre Marie Chimi, Florence Noué et Michelle Fokam. Depuis nos premiers contacts, nous avons partagé au quotidien de nombreuses expériences enrichissantes. Je garde un souvenir impérissable de nos journées passées à la Faculté des Sciences à préparer nos examens de fin de semestre. Merci pour vos conseils et encouragements.

Au Dr. Valery Noiha, Dr. Valerie Djumyom, Dr. Carine Temegne, Messieurs/Mesdames Roger Bruno Tabué, Dr. Tindo née Jacqueline Magwe, Claude Watat, Khinjem Awah, Olivier Chedjou, Valère Djumyong, Roger Kabelong, Judicaël Fomekong, Sandrine Motouom et Carole Medom pour leurs orientations et encouragements ;

A mes promotionnaires du Lycée de Bandjoun et de la Cité Verte (Yaoundé) : Michael Mbandjo, Fabrice Kuate, Arnaud Wafo, Didier Azangué, Chimène Donfack, Mariam Mforifoum, Stéphane Djezet, Sandrine Jeuya et Doriane Kombou pour leurs encouragements.

A tous les membres de l'équipe de recherche dirigée par le Pr. Zapfack à laquelle j'appartiens pour les multitudes remarques ayant contribué à améliorer ce document.

Que mes frères et sœurs trouvent par ce mémoire une source de satisfaction pour l'esprit d'endurance qu'ils n'ont cessé de cultiver en moi. Je pense ainsi à : Harold Njouonang, Monique II Tchatchoung, Chanceline Nanfack, Pany Noutanewo, Loic Tonkam, Laure Stephie Siélachom, Alex Piédjou, Rostand Ouanang, Rita Wannang et Anita Djouonang.

J'exprime aussi ma gratitude à ma compagne Mireille Ngassam pour ses encouragements, ses conseils et ses appuis multiformes.

Aux familles Tchoupo, Nankam, Yamegne, Tonkam, Pieumi, Sonwa, Noutchieu, Nguegip, Tsague et Mvogo pour leurs encouragements.

A Jolie Noudem, Gabriella Tegomo, Rosine Sonwa, Guy Omgba, Dorette Mathe, Honorine Sopie, maman Bernadette et Véronique Dongmo pour leurs encouragements.

A toute la promotion de Doctorat de l'année académique 2014/2015 pour l'esprit d'équipe et l'ambiance développée durant notre cursus.

De nombreuses autres personnes ont énormément contribué à l'aboutissement de ce travail. Il est certes clair que je ne pourrais pas tous les citer ; c'est pourquoi à ceux dont les noms non pas été mentionnés ici, nous leur demandons dès à présent leur indulgence pour cette faiblesse. Que ces nombreuses personnes trouvent cependant ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

.....	ii
LISTE PROTOCOLAIRE DE LA FACULTE DES SCIENCES PAR DEPARTEMENT ET PAR GRADE	iii
DEDICACE.....	xii
REMERCIEMENTS	xiii
SOMMAIRE	xv
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTE DES TABLEAUX.....	xx
LISTE DES ABREVIATIONS	xxi
RESUME.....	xxii
ABSTRACT	xxiv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE.....	6
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE.....	7
I.1. Généralités sur les changements climatiques.....	7
I.1.1. Historique, origine et définition des changements climatiques	7
I.1.2. Gaz à effet de serre et régulation du climat	8
I.1.3. Sources d'émissions de gaz à effet de serre.....	9
I.1.4. Conséquences des changements climatiques	10
I.1.4.1. Conséquences à la surface de la Terre	10
I.1.4.2. Impacts sur les écosystèmes forêts	11
I.2. Initiatives prises en compte dans la lutte contre les changements climatiques ..	11
I.2.1. Prise en compte des forêts dans les négociations internationales de lutte contre les changements climatiques.....	12
I.2.2. Forêts et REDD+.....	13
I.3. Puits/réservoirs planétaires de carbone et surfaces forestières	13
I.4. Structure des écosystèmes forestiers.....	15

I.5. Estimation de la biomasse forestière	15
I.5.1. Généralités sur les équations allométriques	16
I.5.1.1. Définitions.....	16
I.5.1.2. Mise en place des équations allométriques	17
I.5.1.3. Variables de l'arbre.....	18
I.5.1.3.1. Diamètre de l'arbre	19
I.5.1.3.2. Hauteur de l'arbre	19
I.5.1.3.3. Diamètre de la couronne	19
I.5.1.3.4. Densité du bois.....	20
I.5.1.3.4.1. Importance de la densité du bois dans les estimations de biomasse ..	20
I.5.1.3.4.2. Variation de la densité du bois.....	21
I.5.1.4. Test de sélection des meilleures équations pour la prédiction	21
I.5.1.5. Limites des équations allométriques	23
I.5.2. Facteur d'expansion forestier et Ratio	24
I.5.3. Données sur les stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers	26
I.6. Présentation de la zone d'étude	27
I.6.1. Situation géographique	27
I.6.2. Milieu biophysique	29
I.6.2.1. Climat.....	29
I.6.2.2. Relief et sols.....	29
I.6.2.3. Hydrographie	30
I.6.2.4. Flore	30
I.6.2.5. Faune.....	31
I.6.3. Activités humaines et socio-économiques	31
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES.....	33
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES.....	34
II.1. MATERIEL	34
II.1.1. Site d'étude	34
II.1.2. Matériel utilisé.....	34
II.2. METHODES	35
II.2.1. Dispositifs d'échantillonnage	35
II.2.2. Collecte des données d'inventaire	35
II.2.3. Collecte des données de biomasse destructive	36
II.2.3.1. Biomasse épigée	36
II.2.3.2. Biomasse hypogée et biomasse totale	39
II.2.3.3. Détermination de la biomasse sèche et de la densité du bois	40
II.2.3.4. Collecte des données dendrométriques des arbres.....	41

II.2.4. Collecte des données d'estimation de la biomasse	42
II.2.5. Collecte des données de détermination de la teneur en carbone forestière	44
II.3. ANALYSE DES DONNEES	45
II.3.1. Détermination de la richesse spécifique et de la diversité floristique inventoriée	45
II.3.2. Caractérisation de la structure de la végétation	46
II.3.3. Calcul de la densité du bois et de la biomasse sèche totale des arbres	46
II.3.4. Etablissement des équations allométriques	47
II.3.4.1. Critères de sélection des meilleurs modèles	49
II.3.4.2. Comparaison des équations existantes	50
II.3.5. Evaluation de la variation de la densité du bois	50
II.3.6. Détermination du facteur d'expansion de biomasse et du ratio.....	50
II.3.7. Estimation de la biomasse forestière	51
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION	53
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION	53
III.1. RESULTATS	53
III.1.1. Caractérisation de la flore et de la structure de la forêt.....	54
III.1.1.1. Richesse spécifique et indices de diversité floristique	54
III.1.1.2. Structure de la forêt de la zone d'étude	55
III.1.1.2.1. Variation du nombre de tiges en fonction des classes de diamètre	55
III.1.1.2.2. Abondance des tiges et surface terrière	56
III.1.2. Equations allométriques	57
III.1.2.1. Détermination de la densité du bois	57
III.1.2.2. Equations allométriques d'estimation de la biomasse des branches	59
III.1.2.3. Equations allométriques d'estimation de la biomasse épigée	60
III.1.2.4. Equations allométriques d'estimation de la biomasse des différents compartiments de l'arbre	63
III.1.2.4.1. Biomasse du tronc et de la couronne.....	63
III.1.2.4.2. Biomasse des racines et biomasse totale	65
III.1.2.5. Estimation de la hauteur totale et du diamètre de la couronne.....	68
III.1.2.6. Comparaison des équations existantes pour l'estimation de la biomasse dans la zone d'étude	71
III.1.3. Détermination du facteur d'expansion de biomasse et du ratio	72
III.1.3.1. Statistiques descriptives du facteur d'expansion de biomasse et ratio	72
III.1.3.2. Valeurs du facteur d'expansion de biomasse et du ratio spécifique à chaque espèce	72
III.1.3.3. Relation entre les variables dendrométriques de l'arbre, le facteur d'expansion de biomasse et le ratio.....	74

III.1.3.4. Matrice de corrélation entre le facteur d'expansion de biomasse, ratio et les variables dendrométriques de l'arbre	75
III.1.4. Biomasse et teneur en carbone forestière dans la zone d'étude	75
III.1.4.1. Biomasse forestière	75
III.1.4.1.1. Biomasse épigée en fonction du diamètre de l'arbre	75
III.1.4.1.2. Biomasse épigée en fonction des classes de diamètre à l'hectare	76
III.1.4.1.3. Biomasse en fonction des compartiments de l'arbre.....	77
III.1.4.1.4. Contribution de la biomasse par compartiment en fonction des classes de diamètre	78
III.1.4.1.5. Biomasse épigée en fonction des équations locales, pantropicales et autres équations utilisables dans la zone d'étude	80
III.1.4.1.5.1. Comparaison en fonction des classes de diamètre	80
III.1.4.1.5.2. Comparaison en fonction des biomasses épigées moyennes à l'hectare	81
III.1.4.2. Teneur en carbone forestier dans la zone d'étude	82
III.2. DISCUSSION	83
III.2.1. Diversité floristique, caractérisation structurale et biomasse forestière.....	83
III.2.2. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse	85
III.2.2.1. Densité du bois	85
III.2.2.2. Equations allométriques d'estimation de la biomasse épigée	87
III.2.2.3. Equations allométriques d'estimation de la biomasse des compartiments de l'arbre	88
III.2.2.4. Equations allométriques d'estimation de la hauteur et du diamètre de la couronne de l'arbre	90
III.2.2.5. Comparaison des équations existantes	91
III.2.3. Facteur d'expansion de biomasse et ratio pour la zone d'étude.....	92
III.2.4. Biomasse et teneur en carbone forestier	94
CHAPITRE IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	97
CHAPITRE IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	98
IV.1. CONCLUSION	98
IV.2. PERSPECTIVES	100
BIBLIOGRAPHIE	101
ANNEXE.....	114

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Températures moyennes à la surface du globe, classées par ordre décroissant.....	8
Fig. 2. Emissions mondiales des principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique	9
Fig. 3. Stocks de carbone mondiaux épigés et du sol forestier ou non en Giga tonnes de Carbone	14
Fig. 4. Différentes étapes nécessaires pour le développement des équations allométriques....	18
Fig. 5. Répartition des stocks de carbone forestier par compartiment	27
Fig. 6. Situation géographique de l'unité forestière d'aménagement 10 065 dans la Région de l'Est Cameroun.....	28
Fig. 7. Arbres renversés pendant la création des pistes forestières ou lors de la chute des arbres exploités.....	36
Fig. 8. Collectes des données de biomasse des différents compartiments sur les arbres abattus.	37
Fig. 9. Mesure des diamètres à des intervalles réguliers de 2 m.	38
Fig. 10. Mesure de la longueur, largeur et hauteur pour chaque contrefort	38
Fig. 11. Exemple de la partie hypogée d'un arbre n'ayant subi quasiment aucun dommage lors de son déracinement	40
Fig. 12. Pesée des échantillons de l'arbre collecté.	40
Fig. 13. Mesure du diamètre de la couronne de l'arbre.....	42
Fig. 14. Technique de mesure indirecte de la hauteur de l'arbre à l'aide du Relaskope sur la base des pourcentages des pentes obtenues à différents points.....	43
Fig. 15. Différentes étapes entreprises avant la détermination des teneurs en carbone au laboratoire « Queen's Facility for Isotope Research ».....	45
Fig. 16. Familles les plus représentatives de la zone d'étude en termes de nombre d'espèces.	54
Fig. 17. Distribution du nombre de pieds par hectare en fonction des classes de diamètre.....	56
Fig. 18. Variation verticale de la densité du bois en fonction des niveaux de mesure sur l'arbre	58
Fig. 19. Relation entre la biomasse souterraine et le dhp et densité du bois.....	65
Fig. 20. Corrélation entre la hauteur totale et le diamètre de l'arbre et entre le diamètre de la couronne et le diamètre de l'arbre	69
Fig. 21. Relation entre le facteur d'expansion de biomasse, le ratio et les variables dendrométriques (diamètre, hauteur totale et diamètre de la couronne).	74

Fig. 22. Variation de la biomasse en fonction du diamètre de l'arbre	76
Fig. 23. Proportion (%) de la biomasse épigée en fonction des classes de diamètre	77
Fig. 24. Proportion (%) de la biomasse à l'hectare en fonction des compartiments de l'arbre	77
Fig. 25. Evolution des quantités de biomasse des compartiments de l'arbre et du nombre de tiges en fonction des classes de diamètre	79
Fig. 26. Comparaison de la biomasse estimée en fonction des 8 équations considérées sur la base des tests d'ANOVA et de Turkey's.	82
Fig. 27. Nuage de points de la teneur en carbone (%) de 80 échantillons	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Quelques critères/tests utilisés pour choisir un meilleur modèle de prédiction	23
Tableau II. Principales essences exploitées rencontrées dans la zone	30
Tableau III. Equations allométriques prises en compte pour la comparaison de l'estimation de la biomasse forestière.	52
Tableau IV. Richesse spécifique, indices de Shannon, Piélou et Simpson en fonction des classes de diamètre.	55
Tableau V. Caractérisation structurale de la forêt en fonction des classes de diamètre.....	57
Tableau VI. Valeur de la densité du bois des arbres échantillonnés pour l'établissement des équations allométriques	59
Tableau VII. Equations allométriques d'estimation de la biomasse des branches et feuilles. .	60
Tableau VIII. Equations allométriques d'estimation de la biomasse épigée.	62
Tableau IX. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse du tronc et de la couronne.	64
Tableau X. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse racinaire et biomasse totale.	67
Tableau XI. Equations allométriques d'estimation de la hauteur totale et du diamètre de la couronne.	70
Tableau XII. Comparaison des équations existantes considérées dans cette étude.....	71
Tableau XIII. Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées (diamètre, hauteur totale et diamètre de la couronne), du facteur d'expansion de biomasse et du ratio...	72
Tableau XIV. Valeurs spécifiques de facteur d'expansion de biomasse et du ratio dans la zone d'étude	73
Tableau XV. Matrice de corrélation entre les variables dendrométriques de l'arbre et le Ratio	75
Tableau XVI. Compartimentation de la biomasse (t/ha) sur l'arbre en fonction des classes de diamètre	78
Tableau XVII. Biomasses estimées (t/ha) en fonction des équations existantes utilisées	81

LISTE DES ABREVIATIONS

AIC	: Akaike Information Criterion
Adj.R ²	: coefficient de corrélation
ANOVA	: Analyse de Variance
BLA	: Balayage Laser Aéroporté
CF	: « Correction Factor » ou Facteur de correction
Dhp	: Diamètre à hauteur de poitrine
FEB	: Facteur d'Expansion de Biomasse
LCF	: La Côtière Forestière
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Étude du Climat
MDP	: Mécanisme du Développement Propre
MNV	: Mesure, Notification et Vérification
PFNL	: Produits Forestiers Non Ligneux
PLACAM	: Placage du Cameroun
REDD	: Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts
REDD+	: Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière, incluant la conservation, la gestion forestière durable et l'augmentation des stocks de carbone forestier
RFD	: Reserve de Faune du Dja
RPP	: “Readiness Proposal Plan”
RRMSE	: « Relative Root Mean Square Error »
RSE	: « Residual Standart Error » ou l'erreur standard résiduelle

SFIL : Société Forestier et Industrielle de la Lekoundje
SOFIBEL : Société Forestière et Industrielle de Belabo
UFA : Unité Forestière d'Aménagement.

RESUME

L'indisponibilité des équations allométriques spécifiques pour estimer la biomasse forestière a favorisé l'utilisation des équations tropicales générales qui sont des sources potentielles d'erreur dans l'estimation. Pourtant, la mise en œuvre de la stratégie REDD+ passe par une évaluation fiable des stocks de carbone forestier. Cette étude avait pour objectif d'estimer la biomasse forestière sur la base des équations allométriques spécifiques établies dans l'Unité Forestière d'Aménagement (UFA) 10 065 située dans la Région de l'Est Cameroun.

La structure et la diversité ligneuse de la zone d'étude, ont été analysées à l'aide des données d'inventaire des arbres de $d_{hp} \geq 1\text{cm}$ de 7 parcelles de 250 x 20 m pour une superficie échantillonnée de 3,5 ha et 14 sous-parcelles de 10 x 10 m et 10 x 20 m (0,21 ha). Les indices de diversité, la densité à l'hectare et la surface terrière ont été calculées. Les données de biomasse de 237 arbres ($1 \leq dbh \leq 121\text{ cm}$) obtenues par la méthode destructive ont été utilisées pour l'établissement des équations allométriques pour l'estimation de la biomasse épigée. Les équations pour estimer la biomasse racinaire et totale ont été développées à partir des données de 25 et 13 arbres respectivement et celles pour estimer la biomasse du tronc et de la couronne à partir de 96 arbres. Les variables prédictives étaient le diamètre, la hauteur, la densité du bois et le diamètre de la couronne. Les tests supplémentaires ont permis de valider les meilleurs modèles de prédiction. La comparaison avec les équations existantes a été faite à partir des données des biomasses observées. La biomasse des compartiments de l'arbre a été estimée à l'aide des équations allométriques spécifiques à la zone d'étude. La valeur moyenne de la teneur en carbone contenue dans la biomasse forestière a été déterminée à partir de 80 échantillons collectés sur 19 arbres. Le facteur d'expansion de biomasse et le ratio ont été calculés à partir des données de biomasse mesurée sur 96 arbres. La corrélation entre ces facteurs et les variables dendrométriques de l'arbre a été faite à l'aide du coefficient de Pearson. La fraction du carbone contenue dans la biomasse est estimée à 46 %. Les valeurs du facteur d'expansion de biomasse et ratio trouvées dans le cadre de cette étude sont respectivement de 2,18 et 0,22.

Les données d'inventaires ont permis de relever que les familles les plus représentatives étaient les Meliaceae, les Malvaceae, les Fabaceae et les Euphorbiaceae. L'indice de Shannon (2,47 - 3,88) témoigne d'une riche diversité floristique dans la zone d'étude. En moyenne 5472 tiges ont été trouvées à l'hectare et leur abondance diminue avec l'augmentation des classes de diamètre. La surface terrière était en moyenne de 41,60 m²/ha. Les arbres de dhp \geq 10 cm malgré leur faible abondance (409 tiges/ha), avaient la surface terrière la plus élevée (36,75 m²/ha).

La prise en compte du diamètre de la couronne dans le modèle allométrique améliore la qualité de la prédiction. Le modèle : $M = e^{(-2,500+0,817 \times \ln(D^2 \times H)+0,817 \times \ln(\rho))+0,449 \times \ln(C)}$ avec quatre variables prédictives était le meilleur ajustement pour l'estimation de la biomasse épigée. Toutefois, la validation des modèles avec les données mesurées n'a pas confirmé ce résultat. Il a montré plutôt que le diamètre de l'arbre est un bon prédicteur de la biomasse (épigée, hypogée, tronc et couronne), hauteur et diamètre de la couronne de l'arbre. La comparaison de la biomasse épigée observée dans la zone d'étude avec d'autres équations allométriques existantes pouvant être appliquées à la zone d'étude a montré que l'équation de Djomo et *al.* (2016) était le meilleur prédicteur de la biomasse épigée du site d'étude et est recommandée pour les autres forêts tropicales humides d'Afrique Centrale en l'absence d'équations allométriques spécifiques.

La biomasse totale dans la zone d'étude a été estimée à 421 t/ha. Le tronc était le compartiment de l'arbre ayant la biomasse la plus élevée (220 t/ha, 52 %), suivi de la couronne (146 t/ha, 35 %) et enfin des racines (55 t/ha, 13 %). La classe de diamètre dominante de la forêt (dhp > 60 cm) malgré leur faible abondance à l'hectare (33 tiges/ha) contribue en moyenne à 52 % à la biomasse épigée forestière. Huit équations existantes ont été utilisées pour comparer l'estimation de la biomasse à partir des données d'inventaire issues de cette étude. La biomasse varie de 261 t/ha pour l'équation de Ngomanda et *al.* (2014) à 437 t/ha pour l'équation de Djomo et *al.* (2010) et le test d'ANOVA a montré qu'il existe une différence significative entre les biomasses estimées à partir de ces équations.

Les données de biomasse de cette étude peuvent être considérées comme des contributions nécessaires pour la mise en application du processus REDD+ au Cameroun.

Mots clés : Equations allométriques, diversité floristique, biomasse forestière, facteur d'expansion de biomasse et ratio, forêt dense semi-décidue.

ABSTRACT

The unavailability of site-specific allometric equations to estimate forest biomass has promoted the use of general equations in tropical moist forests which are the potential errors sources in the estimates. Yet, the implementation of REDD+ strategy requires a reliable assessment of forest carbon stocks. The objective of this study was to estimate forest biomass on the basis of the site-specific allometric equations established in the Forest Management Unit (FMU) 10 065 localized in Eastern Region of Cameroon.

The structure and diversity of the study area were analyzed using the tree inventory data with $\text{dbh} \geq 1\text{cm}$ from 7 plots of 250 x 20 m for a total sample area of 3.5 ha and 14 sub-plots of 10 x 10 m and 10 x 20m (0.21 ha). The diversity indices, density per hectare and basal area were calculated. The data of 237 trees ($1 \leq \text{dbh} \leq 121\text{ cm}$) obtained by destructive method were used to develop allometric equations for the estimation of aboveground biomass. The equations to estimate belowground and total biomass were developed from data of 25 and 13 trees respectively and those to estimate biomass trunk and crown were developed from data of 96 trees. Predictive variables considered were diameter, height, wood density and crown diameter. Supplementary tests have permitted the validation of the best prediction models. The comparison with the existing equations was done based on the observed biomass data. The biomasses of tree compartments were estimated using site-specific allometric equations of the study area. The mean value of the carbon content in the forest biomass was determined from 80 samples collected from 19 trees. The biomass expansion factor and the ratio were calculated based on biomass data measured on 96 trees. The correlation between these factors and the dendrometric variables of the tree was done with the help of Pearson coefficient. The

fraction of the carbon contained in the biomass was estimated at 46 %. The biomass expansion factor and ratio values found in this study were 2.18 and 0.22 respectively.

The inventory data from the study revealed the Meliaceae, Rubiaceae, Moraceae, Malvaceae, Euphorbiaceae as the most representative families. The Shannon index (2.47 - 3.88) showed a rich floristic diversity in the study area. An average of 5472 stems were found per hectare and their abundance decreased with the increasing diameter classes. The average basal area was 41.60 m².ha⁻¹. Despite their low abundance (409 stems.ha⁻¹), trees with dbh ≥ 10 cm had the highest basal area (36.75 m².ha⁻¹).

Taking into account the diameter of the crown in the allometric model improves the quality of the prediction. The model: $= e^{(-2.500+0.817 \times \ln(D^2 \times H)+0.817 \times \ln(\rho))+0.449 \times \ln(C)}$ with four predictive variables was the good adjustment for aboveground biomass estimation. However, the validation of the models with the measured data did not confirm this result. It showed earlier that the diameter of the tree is a good predictor of the biomass (above, below, trunk and crown) total height and crown diameter of the trees. The comparison of aboveground biomass observed in the study area with other existing allometric equations that can be applied to the study area showed that the equation of Djomo et al. (2016) was the best predictor of survey site biomass and is recommended for other tropical rainforests in Central Africa in the absence of specific allometric equations.

The total biomass in the study area was estimated at 421 t.ha⁻¹. The trunk was the tree compartment with the highest biomass (220 t.ha⁻¹, 52 %), followed by the crown (146 t.ha⁻¹, 35 %) and roots (55 t.ha⁻¹, 13 %). The dominant diameter class of the forest (dbh > 60 cm), despite their low abundance per hectare (33 stems.ha⁻¹) contributes on average 52 % of the forest biomass. Eight existing equations were used to compare aboveground biomass estimate according to data inventory of the study area. Aboveground biomass ranged from 261 t.ha⁻¹ for the Ngomanda et al. (2014) to 437 t.ha⁻¹ for the equation of Djomo et al. (2010) and the ANOVA test showed that there is a significant difference between the biomass estimated from these equations.

The biomass data of this study can be considered as a necessary contribution to implement the REDD+ process in Cameroon.

Key words: Allometric equations, floristic diversity, forest biomass, biomass expansion factor and ratio, semi-deciduous moist forest.

INTRODUCTION

Les forêts tropicales occupant seulement 7 % de la superficie du globe terrestre, abritent à elles seules plus de 60 % des espèces de la planète (Nochur & Muller, 2005 ; Maréchal *et al.*, 2013). La destruction de ces forêts entraîne non seulement la perturbation du climat, mais aussi le bouleversement de l'unité floristique de la végétation pionnière (Hairiah *et al.*, 2011 ; Desclée *et al.*, 2013). Dans ces écosystèmes forestiers, les activités humaines sont à l'origine de l'altération de leur structure, de leur composition floristique, des densités des espèces qui les constituent et de sa capacité de régénération et de stockage de carbone (Nguenang *et al.*, 2010; Djomo, 2015a). Fongnzossie *et al.* (2008) et Onana (2011), relevaient déjà le fait que certaines espèces perdent leur habitat et parfois disparaissent de manière définitive sans être même connues de la science. De plus, face au réchauffement planétaire qui ne cesse de croître, la contribution efficace de ces forêts dans les processus d'atténuation des changements climatiques n'est plus à démontrer (Hairiah *et al.*, *up.cit*). En effet, ces forêts ont la capacité d'absorber et stocker le carbone atmosphérique (CO₂) dans leurs tissus sous forme de biomasse par le processus de photosynthèse (Rusu, 2013). Elles ont épuré plus d'un quart des émissions planétaires imputables à la combustion des combustibles fossiles (Le Quéré *et al.*, 2015). Ces forêts sont devenues l'un des grands enjeux des négociations internationales dans la lutte contre les changements climatiques (Anonyme, 2007).

Les quantités de biomasse forestières sont estimées en moyenne à 350 t/ha pour les forêts tropicales d'Afrique (Day *et al.*, 2013). Elles varient de 170 à 689 t/ha selon les écosystèmes (Djuikouo *et al.*, 2010 ; Day *et al.*, 2013 ; Lewis *et al.*, 2013 ; Zapfack *et al.*, 2013 ; Tabue *et al.*, 2016 ; Chimi *et al.*, 2018). Locatelli (2005) et Djomo *et al.* (2011) estiment qu'à l'échelle de l'arbre, cette biomasse varie également selon ses compartiments. Le tronc est le compartiment de l'arbre dont la contribution à la biomasse forestière est majoritaire ; soit plus de 50 % (Vahedi *et al.*, 2014). La canopée contribue en moyenne à 36 % à la biomasse forestière (Ploton *et al.*, 2016) et les racines quant à elles représentent en moyenne 15 % de la biomasse forestière (Locatelli, 2005). Cependant, cette biomasse racinaire représente environ ¼ de la biomasse épigée (Mokany *et al.*, 2006).

Le processus de Réduction des Emissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la Déforestation et de la Dégradation des forêts (REDD) dans les pays en voie de développement a émergé en tant qu'instrument incitatif pour intégrer les forêts tropicales dans la lutte contre

les changements climatiques de par leur potentiel de stockage de carbone. Aussi bien au niveau international que national, le processus fait encore l'objet de controverses dont certaines tiennent à l'indisponibilité ou l'insuffisance des données scientifiques pour sa mise en œuvre (Djomo *et al.*, 2010 ; Picard *et al.*, 2012). Pour les biomasses/stocks de carbone, cette mise en œuvre passe par une évaluation fiable des puits de carbone. Malgré la nécessité des moyens financiers très élevés et sa contribution à la dégradation des forêts, la méthode destructive est la plus précise pour déterminer la biomasse (Brown *et al.*, 1989 ; Basuki *et al.*, 2009 ; Fayolle *et al.*, 2013, Mugasha *et al.*, 2013 ; Chave *et al.*, 2014 ; Ngonmanda *et al.*, 2014 ; Djomo & Chimi, 2017). D'autres méthodes indirectes (non destructives) peuvent être utilisées pour la prédiction de cette biomasse. Il s'agit par exemple des équations allométriques (Chimi *et al.*, 2018), de la télédétection (Kumar *et al.*, 2015), des facteurs d'expansion (Tobin & Nieuwenhuis, 2007 ; Sanquetta *et al.*, 2011).

La télédétection est une approche qui vient compléter les autres méthodes pour l'évaluation de la biomasse bien que particulièrement appropriée pour des surfaces à grande échelle (Kumar *et al.*, 2015 ; Kurz *et al.*, 2016). Pour Dube *et al.* (2016), cette technique apparaît comme une bonne alternative pour les surveillances de la biomasse forestière, en particulier dans les tropiques où le diamètre de la couronne est un prédicteur qui apparaît comme une importante variable employée pour convertir les données de télédétection en quantité de biomasse (Ploton *et al.*, 2016). Il est de ce fait un bon outil de suivi du carbone forestier (Kurz *et al.*, 2016). Une autre approche plus simple qui permet d'estimer la biomasse à l'échelle nationale ou même régionale est l'utilisation des Facteurs d'Expansion de Biomasse (FEB). Il s'agit des ratios qui permettent de convertir les données d'inventaire de volume des arbres en biomasse (Tobin & Nieuwenhuis, 2007 ; Sanquetta *et al.*, 2011 ; Magalhães & Seifert, 2015).

L'utilisation des équations allométriques est une autre méthode indirecte alternative pour la prédiction de la biomasse forestière (Alvarez *et al.*, 2012 ; Chave *et al.*, 2014). C'est l'approche la plus communément utilisée essentiellement en Afrique tropicale (Zapfack *et al.*, 2013 ; Lewis *et al.*, 2013). En effet, le développement de ces équations dépend de la disponibilité des données destructives mesurées sur l'arbre. Ainsi, une fois testées et validées, ces équations permettent de prédire la biomasse de l'arbre (variable à expliquer) à partir des variables de l'arbre (variables explicatives) telles que le diamètre, la hauteur, le diamètre de la couronne et la densité du bois (Brown *et al.*, 1989 ; Chave *et al.*, 2005 ; Djomo *et al.*, 2016 ; Ploton *et al.*, 2016). Cependant, les équations spécifiques à un site ou un écosystème (Djomo *et al.*, 2010 ; Djomo *et al.*, 2016) ou mieux spécifiques à chaque espèce (Basuki *et al.*, 2009)

sont préférées pour une meilleure estimation de la biomasse. Mais en cas d'indisponibilité des équations spécifiques, des équations pantropicales sont souvent utilisées même si elles ont été établies à partir des données collectées dans plusieurs continents dans la zone tropicale (Chave *et al.*, 2014 ; Djomo *et al.*, 2016).

Les mensurations de l'arbre les plus communément utilisées pour l'estimation de la biomasse sont le diamètre, la hauteur et la densité du bois. Certaines variables de l'arbre (exemple le diamètre de la couronne) ne sont pas le plus souvent prises en compte dans l'établissement des modèles allométriques. Pourtant, le diamètre de la couronne a récemment émergé comme une variable importante dont la prise en compte dans les modèles allométriques améliore la qualité de la prédiction de la biomasse (Xu *et al.*, 2016 ; Ploton *et al.*, 2016). Pour Goodman *et al.* (2014), ces quatre variables à elles seules permettent de comprendre l'impact de l'architecture de l'arbre dans la dynamique de la biomasse forestière. Cependant, la densité du bois a été reconnue comme une variable clé de prédiction de la biomasse des arbres à partir des équations allométriques, car elle réduit considérablement les erreurs d'estimation (Nogueira *et al.*, 2005). Elle varie largement en fonction des espèces. Zanne *et al.* (2009) ayant évalué la densité du bois de 8411 espèces collectées dans tous les continents, ont trouvé une variation interspécifique qui varie de 0,08 à 1,39. Pour une même espèce donnée, elle varie de la base vers les branches et aussi de l'écorce vers le cœur de l'arbre (Wiemann & Williamson, 1989 ; Fearnside, 1997 ; Nogueira *et al.*, 2004 ; Henry *et al.*, 2010 ; Ngoukwa, 2016 ; Djomo *et al.*, 2017). Ainsi, la détermination de la densité du bois d'une espèce sans tenir compte de ces variations rendrait les résultats d'estimation de la biomasse peu fiables (Momo, 2012).

Dans l'optique d'œuvrer à l'implémentation de la REDD+, le Cameroun avec la diversité de ses écosystèmes forestiers appartenant au Bassin du Congo (Letouzey, 1985) a ratifié le protocole de « Mesure, Notification et Vérification » en 2008. Pour sa mise en œuvre, il est important que les stocks de carbone des divers écosystèmes et des différents types d'utilisation des terres soient pris en compte. Compte tenu des recherches bibliographiques effectuées, les études d'estimation de la biomasse forestière sont beaucoup plus axées sur les écosystèmes tels que : les réserves forestières sur terre ferme et/ou périodiquement inondées telles que les marécages (Djuikouo *et al.*, 2010 ; Day *et al.*, 2013 ; Lewis *et al.*, 2013 ; Zapfack *et al.*, 2013 ; Tabue *et al.*, 2016), les systèmes agroforestiers (Jagoret *et al.*, 2008 ; Zapfack *et al.*, 2016) et les jachères (Zapfack, 2005). Ces travaux n'ont pas pris en compte les cas des espaces forestiers soumis aux exploitations malgré le fait qu'en plus d'appartenir au domaine permanent de l'Etat selon la loi forestière de 1994, représentent

d'importants réservoirs de carbone au vu de leurs superficies qui représentent près de 39 % des forêts domaniales du Cameroun (Anonyme, 2015).

Compte tenu des difficultés liées à l'échantillonnage de la partie hypogée (racines) des arbres (Levy et *al.*, 2004; Mokany et *al.*, 2006 ; Sanquetta et *al.*, 2011 ; Mugasha et *al.*, 2013), ce compartiment est difficilement pris en compte lors des études d'estimation de la biomasse dans les écosystèmes forestiers. Il est donc question dans ce travail de contribuer à la connaissance des quantités de biomasses précises stockées dans ces écosystèmes forestiers tropicaux de la région de l'Est Cameroun. Pour cela, la quantification de cette biomasse nécessite le développement des outils mathématiques d'estimation comme par exemple les équations allométriques.

L'utilisation des équations générales pour l'estimation de la biomasse forestière est une source d'erreur dans l'estimation et donne le plus souvent des résultats insatisfaisants. Pour Picard et *al.* (2015), en Afrique tropicale, il a été montré qu'outre les erreurs de mesure sur le terrain, le choix de l'équation allométrique à lui seul pourrait contribuer à près de 75 % à l'erreur totale dans les estimations de la biomasse de l'arbre. Il est donc important pour la fiabilité des quantités de biomasses estimées que des équations allométriques locales soient utilisées (Basuki et *al.*, 2009). Il est question dans cette étude d'estimer la biomasse sur la base des équations spécifiques établies dans la zone d'étude. L'hypothèse de recherche étant : la précision de biomasse forestière est améliorée lorsque l'on utilise les équations allométriques spécifiques à la zone d'étude. Plus spécifiquement, les hypothèses spécifiques étaient :

- la flore ligneuse de la zone d'étude est riche et diversifiée en terme de richesse spécifique;
- il existe une spécificité des équations allométriques pour la prédiction de la biomasse des arbres et de la hauteur de l'arbre à la zone d'étude;
- il existe un facteur d'expansion et un ratio spécifique à la zone d'étude ;
- la biomasse forestière dans la zone d'étude est élevée et supérieure à 400 t/ha.

La présente étude menée dans la forêt de Deng Deng, Région de l'Est Cameroun avait pour objectif général d'estimer la biomasse forestière sur la base des équations allométriques spécifiques établies. Les objectifs spécifiques de cette étude étaient de :

- caractériser la flore inventoriée et la structure de la végétation de la forêt de la zone d'étude ;

- établir des équations allométriques spécifiques de prédiction de la biomasse des arbres, de la hauteur totale et du diamètre de la canopée de la zone d'étude ;
- déterminer le facteur d'expansion de biomasse et le ratio spécifique à la zone d'étude ;
- estimer la biomasse forestière et la teneur en carbone.

Ce document est structuré en cinq grandes parties telles que présentées ci-dessous :

- introduction, qui fait état du contexte de cette étude, de la problématique et des objectifs à atteindre ;
- le chapitre 1 concerne la revue de la littérature ; il présente dans un premier temps une synthèse bibliographique et deuxièmement une présentation de la zone d'étude ;
- le chapitre 2 présente le site de collecte des données de terrain, le matériel utilisé, les méthodes utilisées et enfin les méthodes d'analyse des données ;
- le chapitre 3 est celui consacré aux résultats obtenus et à la discussion ;
- le chapitre 4 présente la conclusion générale et les perspectives.

**CHAPITRE I. REVUE DE LA
LITTERATURE**

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.1. Généralités sur les changements climatiques

I.1.1. Historique, origine et définition des changements climatiques

Evoqué pour la première fois dans les années 1800, le réchauffement planétaire est devenu une réalité que connaît le monde depuis des siècles (Syante, 1896 ; Chotte & Kosuth, 2015). Engendré par des processus intrinsèques de la Terre, par des influences extérieures, ou plus récemment, par les activités anthropiques, le changement climatique correspond à une modification durable (de la décennie au million d'années) des paramètres statistiques (paramètres moyens, variabilité) du climat global de la Terre (Marniesse & Filipiak, 2003). Outre l'effet de serre naturel, ce réchauffement climatique apparaît comme une conséquence de l'effet de serre additionnel dû aux multiples activités de l'Homme; d'où son appellation d'effet de serre anthropique (Chotte & Kosuth, 2015). Cet effet se vérifie par les hausses de températures mondiales observées depuis des décennies (Burns & Regier, 2015). En effet, cette température a augmenté en moyenne de 0,8 °C depuis les années 1870 et la décennie actuelle a été la plus chaude jamais enregistrée (Marniesse & Filipiak, 2003 ; Anonyme, 2011a). Elle est donc passée en moyenne de -0,03 °C vers les années 1930 à presque +0,6° C en 2010 (Fig. 1) et selon les prévisions futures, cette augmentation de température devrait atteindre des valeurs moyennes comprises entre 1,1 et 6,4°C d'ici à 2100 (Anonyme, 2011a).

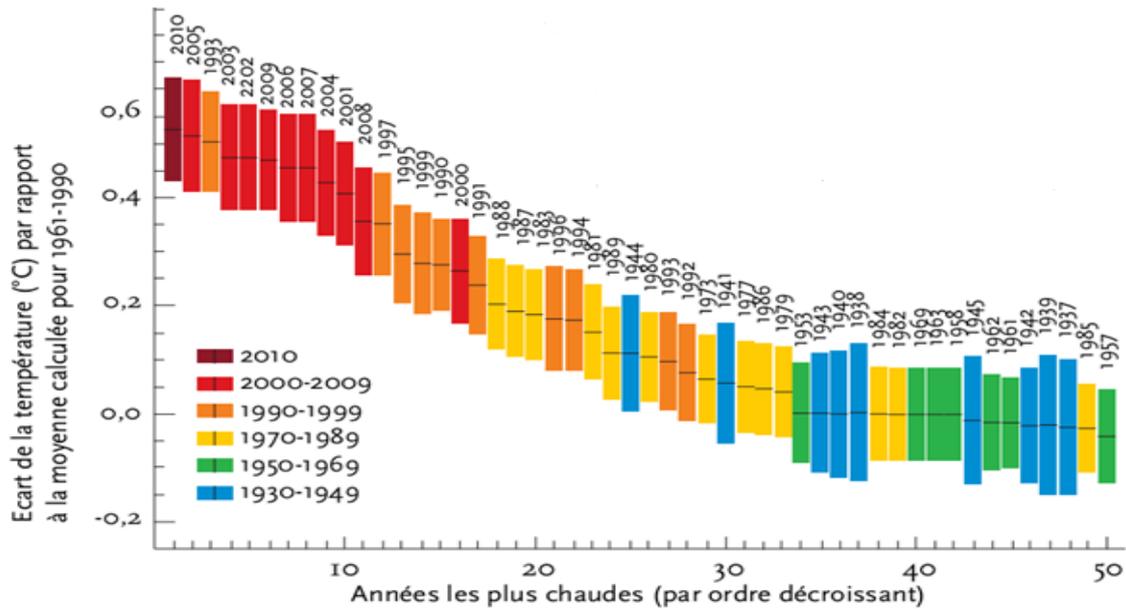


Fig. 1. Températures moyennes à la surface du globe, classées par ordre décroissant. La taille des barres correspond à la marge d'incertitude des valeurs moyennes, en fonction des années, avec un seuil de 95% (Anonyme, 2011a)

I.1.2. Gaz à effet de serre et régulation du climat

La couche atmosphérique qui entoure la planète Terre est composée d'azote (78,1 %), d'oxygène (20,9 %), d'un certain nombre de gaz à l'état de trace dont l'argon (0,93 %), l'hélium et les gaz à effet de serre tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote, de formule N₂O), l'ozone (O₃) et les hydrocarbures halogénés (CFC, SF₆, etc.). La plupart de ces gaz sont naturels et d'autres proviennent des activités humaines (Anonyme, 2007). Sans la présence des gaz « à effet de serre » (GES), la température moyenne de la Terre serait de -18 °C, contre 15 °C actuellement mesurée. En effet, soumise aux rayonnements solaires reçus, la Terre renvoie à son tour, un rayonnement infrarouge dans l'espace, dont une partie est absorbée par l'atmosphère, puis réémise partiellement vers le sol. Ce flux de rayonnement renvoyé sur la terre dépend de la quantité de gaz à effet de serre (GES) présent dans l'atmosphère. C'est ce phénomène qui est appelé « effet de serre » et qui détermine les températures, et par conséquent le climat sur la Terre (Marniesse & Filipiak, 2003 ; Canadell et al., 2009). Pour les scientifiques du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Étude du Climat (GIEC), selon les prévisions, ce réchauffement pourrait augmenter et atteindre jusqu'à 10 °C d'ici à 2150, ce qui serait une catastrophe pour l'humanité.

I.1.3. Sources d'émissions de gaz à effet de serre

L'accroissement de la production des GES, qui serait à l'origine du réchauffement climatique, aurait une origine anthropique, et serait directement lié au développement économique et à l'évolution des modes de vie. Marniesse & Filipiak (2003) regroupent ces GES de la façon suivante:

- le gaz carbonique (CO_2), qui est produit par la combustion de pétrole, charbon et gaz naturels. A lui seul, il représente environ $\frac{3}{4}$ des émissions mondiales;
- le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (N_2O) proviennent principalement des rejets de l'agriculture et les conséquences des changements dans l'utilisation des terres ;
- l'ozone troposphérique (O_3),
- les chlorofluorocarbones (CFC) et ses substituts, etc.

Selon le GIEC (Anonyme, 2007), les principales origines des GES essentiellement ceux qui sont sources du CO_2 peuvent être catégorisées en 5 groupes. Les combustibles fossiles sont les plus importants et représentent 66 % des proportions mondiales de ces sources de CO_2 (Fig. 2).

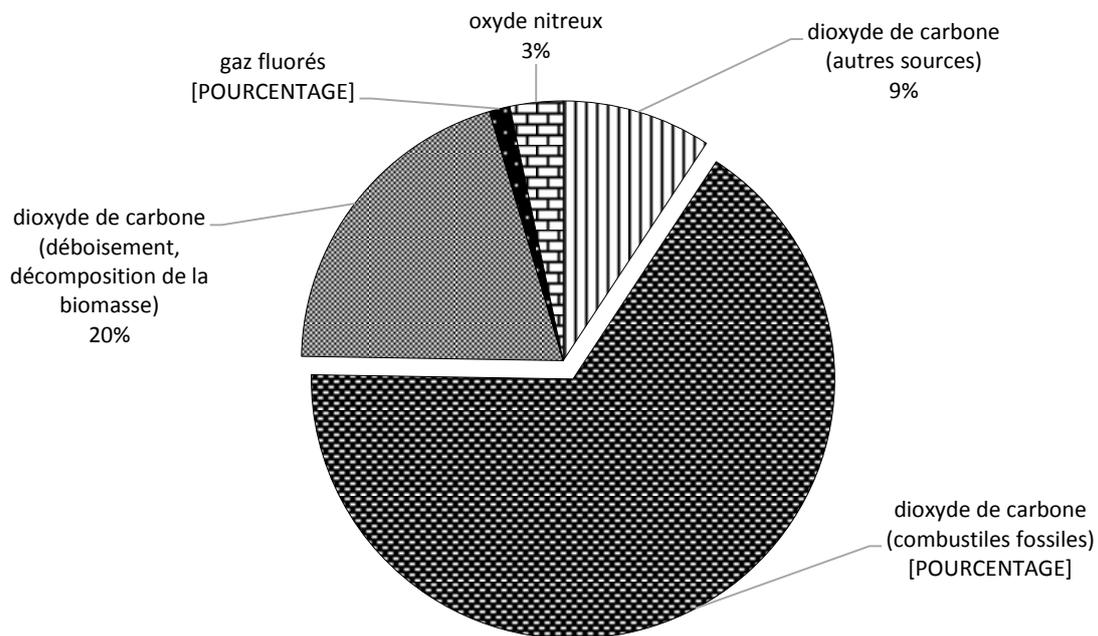


Fig. 2. Emissions mondiales des principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique (Anonyme, 2007).

Face à l'augmentation des concentrations des GES dans l'atmosphère, notamment le CO_2 , de nombreux espoirs ont été placés sur la capacité des arbres, d'autres plantes et du sol à absorber le carbone libéré dans l'atmosphère (Brown & Pearson, 2005).

I.1.4. Conséquences des changements climatiques

I.1.4.1. Conséquences à la surface de la Terre

Les changements climatiques ont des effets sans précédent sur la planète Terre car tous les cycles planétaires sont co-dépendants les uns des autres ; par conséquent, lorsque un cycle est affecté, cela impacte sur les autres cycles (Burns & Reiger, 2015). Des variations ont été observées sur la progression normale prévue de ces cycles sur la température à la surface de la Terre, la salinité des océans et sur le volume des glaciers (Anonyme, 2011a,b,c ; Burns & Reiger, 2015).

Au vu de la reconnaissance par le GIEC de l'accroissement de l'effet de serre (élévation de la température à la surface de la terre) avec l'augmentation des concentrations des gaz radiatifs ou GES (CO₂, CH₄, O₃, N₂O, CFC, etc.) produits par l'activité humaine, il est nécessaire de stabiliser puis de diminuer leur concentration dans l'atmosphère ; au vu de leurs conséquences prévisionnelles à la surface de la Terre. Ainsi, pour Anonyme (2011c), ce changement du climat mondial aura comme principales conséquences :

- l'augmentation du niveau des océans comprise entre 18 et 59 cm en 2100, et plus si l'accélération récente de la fonte des glaciers, mesurée mais non intégrée par les modèles actuels se poursuit ;
- les inondations de certaines zones côtières, comme les deltas où vivent des centaines de millions de personnes ;
- la fonte des glaciers de montagne, du Groenland, de l'Antarctique et de la banquise arctique, diminution de la couverture neigeuse ;
- la multiplication d'événements climatiques extrêmes (canicules, précipitations intenses, sécheresses...)
- si la température augmente de plus de 2 à 3 °C, 20 à 30 % des espèces animales et végétales seront en danger d'extinction ;
- la diminution des ressources en eau et baisse des rendements agricoles dans certaines régions du globe parmi les plus vulnérables (Asie, Afrique) ce qui risque d'engendrer des crises alimentaires ;
- l'augmentation de certaines maladies allergiques et à vecteur (paludisme, fièvre jaune, dengue...).

I.1.4.2. Impacts sur les écosystèmes forêts

Il est aujourd'hui avéré que les changements climatiques affectent de nombreux processus biologiques et écologiques. Le spectre de leur impact sur les plantes étant large, leurs conséquences vont des changements de phénologie des espèces jusqu'à des modifications de l'aire de répartition de celles-ci (Rusu, 2013). De ce fait, ces changements ont un fort impact sur la structure et la diversité biologique des écosystèmes (Desclée et *al.*, 2013 ; Nowak & Romanchuk, 2015).

Cependant, les écosystèmes forestiers contribuent aussi à atténuer les effets du changement climatique grâce aux processus de photosynthèse (Hairiah et *al.*, 2011). En effet, les forêts ont la capacité de capter le CO₂ atmosphérique (qui est la principale forme de GES d'origine anthropique) qu'elles stockent dans leurs tissus sous forme de biomasse et lequel est nécessaire pour la constitution de leurs tissus et leur croissance (Brown & Pearson, 2005). Lorsque ces forêts sont brûlées ou déboisées, on obtient l'effet inverse et ainsi, le carbone qui était stocké est ré-libéré dans l'atmosphère (Rusu, 2013). Ainsi, tandis que la gestion durable des forêts, la plantation, la reforestation et l'afforestation contribuent à conserver ou accroître les stocks de carbone forestier, la déforestation et la dégradation des forêts contribuent plutôt à réduire ces stocks et donc leur rôle d'atténuation des effets du changement du climat (Brown & Pearson, 2005 ; Desclée et *al.*, 2013). Selon Anonyme (2011b), les stocks totaux de carbone dans les forêts tropicales ont diminué d'environ 1,2 Gt/an pendant la période 2000-2010 en raison de l'amenuisement des superficies forestières. Selon Anonyme (2000), dans les années 1990, la séquestration annuelle de carbone par des écosystèmes terrestres était de 2,3 Gt C, alors que les émissions dues aux changements d'utilisation des terres étaient de 1,6 Gt C ; soit un gain de carbone stocké non détruit de près de 0,7 Gt C seulement.

I.2. Initiatives prises en compte dans la lutte contre les changements climatiques

Le changement climatique risque de générer des flux de migrations importants si aucune action n'est prise pour mitiger l'impact de ce changement. En effet, la réussite de cette lutte contre le changement climatique suppose de faire converger des enjeux et intérêts géostratégiques et économiques qui semblent divergents (Degrott et *al.*, 2015). C'est dans ce sens que plusieurs conférences - débats ont été organisées. Parmi elles, les étapes majeures des 25 dernières années sont selon Degrott et *al.* (2015) :

- Rio, en 1992, qui a permis de fixer un premier cadre de lutte contre le réchauffement climatique ;

- Kyoto, en 1997, qui a abouti au premier accord contraignant en matière de limitation des émissions de gaz à effet de serre ;
- Copenhague, en 2009, où il a été convenu de mettre en place un « Fonds Vert » pour aider les pays moins développés et plus vulnérables au changement climatique à s'adapter et à participer aux efforts internationaux visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre ;
- Cancun, en 2010, où les Etats ont approuvé la mise en place du Fonds Vert qui doit être doté de 100 milliards de dollars par an à partir de 2020 ;
- Durban, en 2011, qui a abouti à un résultat décevant mais où les Etats se sont tout de même accordé pour qu'un accord global soit adopté d'ici 2015, de sorte que la COP 21 constitue l'ultime limite pour respecter ce calendrier ;
- Paris, 2015 (COP 21), limiter la hausse de la température globale à "bien moins de 2°C" d'ici à 2100 et à poursuivre les efforts en direction des 1,5 °C. Les pays riches, responsables historiques du réchauffement, ont promis d'augmenter leurs aides pour arriver en 2020 à 100 milliards de dollars par an pour financer les politiques climatiques des pays en développement. Mais ces derniers demandent plus de garanties et un engagement après 2020.

I.2.1. Prise en compte des forêts dans les négociations internationales de lutte contre les changements climatiques

Les forêts ont épuré plus des 1/4 des émissions planétaires imputables à la combustion des combustibles fossiles pendant ces vingt dernières années ; ainsi, elles sont devenues l'un des grands enjeux des négociations internationales dans la lutte contre les changements climatiques (Le Quéré et *al.*, 2015). La reconnaissance de l'immense rôle qu'elles jouent dans l'atténuation des changements climatiques a été consacrée avec l'adoption en 1992 de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et plus tard en 1997 avec le protocole de Kyoto, le Mécanisme du Développement Propre (MDP), les conférences des parties et plus récemment la REDD+. A l'issue de ces dernières, les signataires s'engagent à stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation significative du climat, tout en mettant un accent particulier sur la place centrale des écosystèmes forestiers dans cette régulation du climat à de faibles coûts (Desclée et *al.*, 2013).

I.2.2. Forêts et REDD+

Le mécanisme REDD+ consiste à compenser les pays en voie de développement qui contribueraient à gérer écologiquement leurs écosystèmes afin d'atténuer les effets des changements climatiques. En effet, ayant reconnu le potentiel des forêts dans la réduction des émissions des GES dans l'atmosphère, ce mécanisme préconise les activités de réduction de la déforestation et de la dégradation forestière et soutient les activités liées à la conservation, à la gestion durable des forêts et à l'accroissement des stocks de carbone forestier (Desclée et *al.*, 2013). C'est dans ce sens qu'il a évolué de la Réduction des Émissions dues à la Déforestation (RED) depuis sa présentation à la Conférence des Parties en 2005, jusqu'à la REDD++ qui renvoie à la réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation forestière, incluant la conservation, la gestion forestière durable et l'augmentation des stocks de carbone forestier et enfin la prise en compte de tous les changements qui surviennent dans le couvert des terres et qui affectent le stockage du carbone, que ce soit les tourbières ou les sols minéraux, les arbres à l'extérieur des forêts, l'agroforesterie, les plantations forestières ou les forêts naturelles (Rusu, 2013).

L'implémentation de la REDD+ nécessite le protocole de « Mesure, Notification et Vérification » (MNV) pour le suivi et la vérification des réductions d'émissions réelles permettant ainsi de bénéficier des financements carbone, ceci dans les pays volontaires. De ce protocole, le Cameroun qui s'est engagé depuis 2008 est à la phase « Mesure ». Pour cela, il est important de quantifier de façon précise les stocks de carbone des écosystèmes et de suivre les efforts de réduction des émissions lesquels aboutiront à une compensation financière pour la réduction de la déforestation et la dégradation des forêts.

I.3. Puits/réservoirs planétaires de carbone et surfaces forestières

Un puits de carbone est un réservoir qui absorbe plus de carbone qu'il n'en rejette. Dans ce sens, la biosphère apparaît comme le plus important puits de carbone de la planète dont les quantités sont estimées à 2500 Gt (Anonyme, 2007 ; Hairiah et *al.*, 2011). Les forêts, les sols, les océans et l'atmosphère emmagasinent tous du carbone qui circule continuellement sous forme organique et inorganique.

Pour le GIEC (Anonyme, 2007), les quantités de carbone que renferment les forêts à elles seules sont de 1120 Gt C. Les quantités de biomasses forestières totales sont estimées à 1120 Gt C ; ce qui correspond à une biomasse épigée de 488 Gt C et une biomasse du sol de 632 Gt C. Cependant, la biomasse totale hors forêts reste plus élevée que celle des forêts. Elle

est estimée à 1070 Gt C ; soit 122 Gt C de biomasse épigée et 932 Gt C de biomasse du sol (Fig. 3). Selon Dixon et *al.* (1994), de façon générale, le carbone est emmagasiné dans sept réservoirs à savoir les arbres au-dessus du sol (biomasse ligneuse épigée), végétation non ligneuse au-dessus du sol (herbacées), les racines en sous-sol (biomasse hypogée), les détritiques sur le plancher forestier, le bois mort, les sols, et les produits de bois à longue durée d'existence.

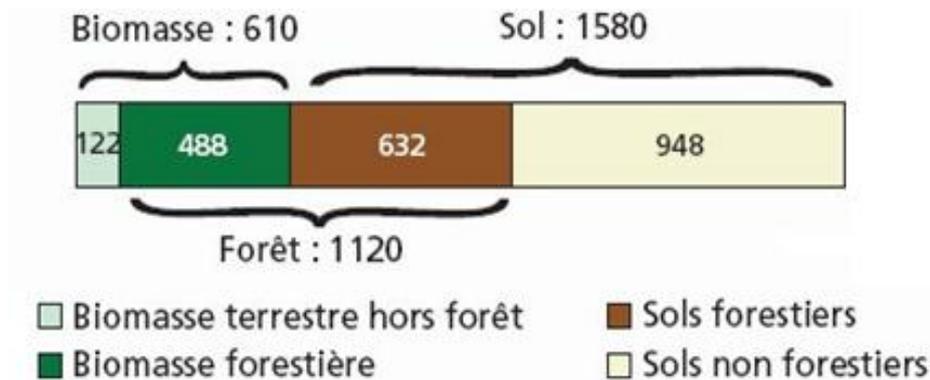


Fig. 3. Stocks de carbone mondiaux épigés et du sol forestier ou non en Giga tonnes de Carbone (Anonyme, 2007).

Les surfaces forestières mondiales, estimées à près de 4 milliards d'hectares, occupent 30 % de la surface terrestre. Elles sont réparties en 47 % de forêts tropicales, 33 % de forêts boréales et 3,8 % de plantations (Anonyme, 2011b). Ces forêts stockent dans leur réservoir de carbone environ 652 Gigatonnes de carbone (Anonyme, 2011b ; Rusu, 2013). L'intérêt porté sur ces écosystèmes forestiers est grandissant aussi bien en zone tempérée qu'en zone intertropicale. Ces écosystèmes forestiers accumulent entre 25 à 50 % du carbone (Anonyme, 2009 ; Zianis, 2008) en forêt. L'absorption du carbone atmosphérique nette varie de 0,7 à 1,0 GtC/an (Anonyme, 2007).

Les forêts du Bassin du Congo qui couvrent environ 300 millions d'hectares, représentent le deuxième massif forestier tropical après celui amazonien et abrite une riche biodiversité (Maréchal *al.*, 2013). Ces forêts sont partagées entre huit pays à savoir le Burundi, le Cameroun, le Gabon, la Guinée équatoriale, la République centrafricaine, la République Démocratique du Congo, la République du Congo et le Rwanda (Anonyme, 2011c). En dépit de sa vaste superficie, seuls 37,3 millions d'hectares sont classés en aires protégées. Une grande partie de ces forêts sont exposées à l'exploitation illégale ou non durable, souvent au détriment des 60 millions de personnes vivant des ressources forestières (Desclée et *al.*, 2013). En dépit de cette situation, ces forêts à l'heure actuelle, recouvrent

toujours la majeure partie de l'Afrique centrale et restent un puissant moteur d'atténuation des changements climatiques (Fayolle et *al.*, 2013 ; Lewis et *al.*, 2013). Ces forêts représentent 23 % des réserves de carbone tropicales mondiales et stockent plus de 50 000 millions de tonnes de carbone (Anonyme, 2011b).

Le Cameroun (situé entre le 8-16 ° de longitude Est et le 2-13 ° de latitude Nord) est un pays d'une superficie totale de 475 000 Km². Son couvert forestier s'étend entre le 2^{ème} et le 4^{ème} degré de latitude Nord. Ce pays regorge une grande homogénéité d'écosystèmes et comprend ainsi : les forêts denses humides sempervirentes, les forêts denses humides semi-décidues, les forêts mixtes, les galeries, les forêts marécageuses, les plantations forestières, etc. (Letouzey, 1985). A eux seuls, les écosystèmes forestiers et savanicoles représentent plus 50 % de la superficie du territoire national (Jiofack et *al.*, 2013). Si l'on s'en tient uniquement aux forêts, les formations forestières du Cameroun couvrent environ 19 916 km² ; soit près de 42 % de la superficie du territoire national (Anonyme, 2011b). Ces formations forestières représentent environ 11,4 % des forêts du bassin du Congo (Megevand et *al.*, 2013) et stockent près de 4033 millions de tonnes de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine, dans la litière et dans le sol (Anonyme, 2011b).

I.4. Structure des écosystèmes forestiers

La forêt prend généralement plusieurs définitions selon les auteurs. Selon Djomo (2015a), un écosystème forestier est une surface constituée abondamment par des arbres, et d'autres plantes vivantes telles que les arbustes, les arbrisseaux, les herbes, etc. Du point de vue structural, une forêt est un écosystème forestier complexe dont les caractéristiques telles que le diamètre, la hauteur moyenne ou dominante, la surface terrière, le nombre de pieds à l'hectare, la distribution des classes de diamètre, les indices de diversité, sont nécessaires pour la caractérisation structurale (Djuikouo et *al.*, 2010 ; Djomo, 2015a,b). Cependant, l'homme de par ses activités sur cet écosystème, modifie, altère cette structure.

I.5. Estimation de la biomasse forestière

La biomasse forestière peut être évaluée par plusieurs méthodes, dont la plus précise est la méthode destructive c'est-à-dire, qui nécessite que l'arbre soit abattu et pesé. Cependant, celle-ci est non seulement destructive de l'écosystème (dégradation forestière), mais aussi demande beaucoup de temps et des moyens financiers énormes (Basuki et *al.*, 2009). En plus de la méthode destructive, cette biomasse peut être indirectement mesurée à partir des indices satellitaires, Lidar ou radar, régressions allométriques, facteur d'expansion,

lesquels reposent sur des relations calibrées à partir des mesures de terrain et des inventaires. Les mesures de terrain apparaissent donc comme la pierre angulaire sur laquelle repose tout l'édifice de l'estimation des stocks de carbone forestier quelques soient les échelles considérées (Picard *et al.*, 2012 ; Chave *et al.*, 2005 ; Sanquetta *et al.*, 2011 ; Picard *et al.*, 2012 ; Djomo & Chimi, 2017).

Toutefois, les équations allométriques apparaissent comme l'une des approches les plus faciles et spécifiques de l'estimation de la biomasse car elles dépendent des caractéristiques dendrométriques de l'arbre dont sa biomasse est prédite (e.g. Brown *et al.*, 1989 ; Picard *et al.*, 2012 ; Djomo *et al.*, 2016). Mais qu'entend-t-on par équations allométriques et comment est-ce qu'elles sont établies?

I.5.1. Généralités sur les équations allométriques

I.5.1.1. Définitions

À l'échelle d'une population, il existe une relation statistique entre les différentes mensurations d'un individu (Gould, 1966). Cette relation découle du développement ontogénique des individus, qui est, à la variabilité liée à l'histoire de vie près, le même pour tous. Ainsi, les proportions entre hauteur et diamètre, entre taille du houppier et diamètre, entre biomasse et diamètre, obéissent à une règle qui est la même pour tous les arbres vivants dans les mêmes conditions, du plus petit au plus gros (Picard *et al.*, 2012). Il s'agit du principe de base de l'allométrie, qui permet de prédire une mensuration d'un arbre (typiquement sa biomasse) en fonction d'autres mensurations comme par exemple son diamètre, sa hauteur totale et sa densité du bois (Henry *et al.*, 2010 ; Picard *et al.*, 2012 ; Djomo, 2015a).

Les équations allométriques sont donc des outils mathématiques développés à partir des mesures directes collectées sur les arbres et utilisées pour prédire par la méthode non destructive la biomasse ou d'autres mensurations des autres arbres (Brown *et al.*, 1989 ; Smith et Whelan, 2006 ; Djomo & Chimi, 2017). Pour Ibrahima *et al.* (2002), elle est une formule/équation qui modélise de manière quantitative la relation entre paramètres dendrométriques et la masse de l'arbre. Brown *et al.* (1989) quant à eux, préconisent que la pertinence des équations allométriques repose sur le fait qu'il existe une relation de proportionnalité entre les accroissements relatifs des dimensions d'un individu par exemple la biomasse et le diamètre d'un arbre. Cependant, cette relation statistique entre la biomasse et les variables explicatives n'est valable que si cette relation a une réalité biologique, sinon, son utilisation pourrait aboutir à des sources d'erreurs dans l'estimation (Picard *et al.*, 2012).

I.5.1.2. Mise en place des équations allométriques

La mise sur pied des équations allométriques tient compte de plusieurs étapes que Picard *et al.* (2012) regroupent en 7 phases telles que présentées sur la figure 4. Cette mise en place va de la planification de l'échantillonnage à la prédiction et la validation des modèles en passant par la collecte des données de terrain.

La conception du plan d'échantillonnage à mesurer est nécessaire pour réduire les erreurs d'échantillonnage (Djomo, 2015a) ou alors les erreurs de prédiction qui permettent de déterminer la fiabilité du modèle choisi (Xiao *et al.*, 2011 ; Picard *et al.*, 2012). Pour le choix des arbres, plus le nombre d'arbres à échantillonner augmente, plus la précision du modèle augmente. De même, les variables explicatives sont donc à chercher parmi celles qui semblent avoir une influence directe sur la croissance des arbres (Nelson *et al.*, 1999 ; Goodman *et al.*, 2014 ; Xu *et al.*, 2015). De plus, pour une meilleure précision, si la variable considérée est le diamètre par exemple, toutes les différentes classes de diamètre doivent être prises en compte dans l'établissement de l'équation allométrique afin que la régression soit fiable (Fig. 4a,b).

Une fois la phase de collecte des données de terrain sur tous les arbres choisis (biomasse, diamètre, hauteur, densité, etc.) achevée (Fig. 4c), il s'en suit la saisie et mise en forme des données, les explorations graphiques des données, les ajustements des équations allométriques et la prédictions et validation du modèle (Fig. 4d,e,f,g).

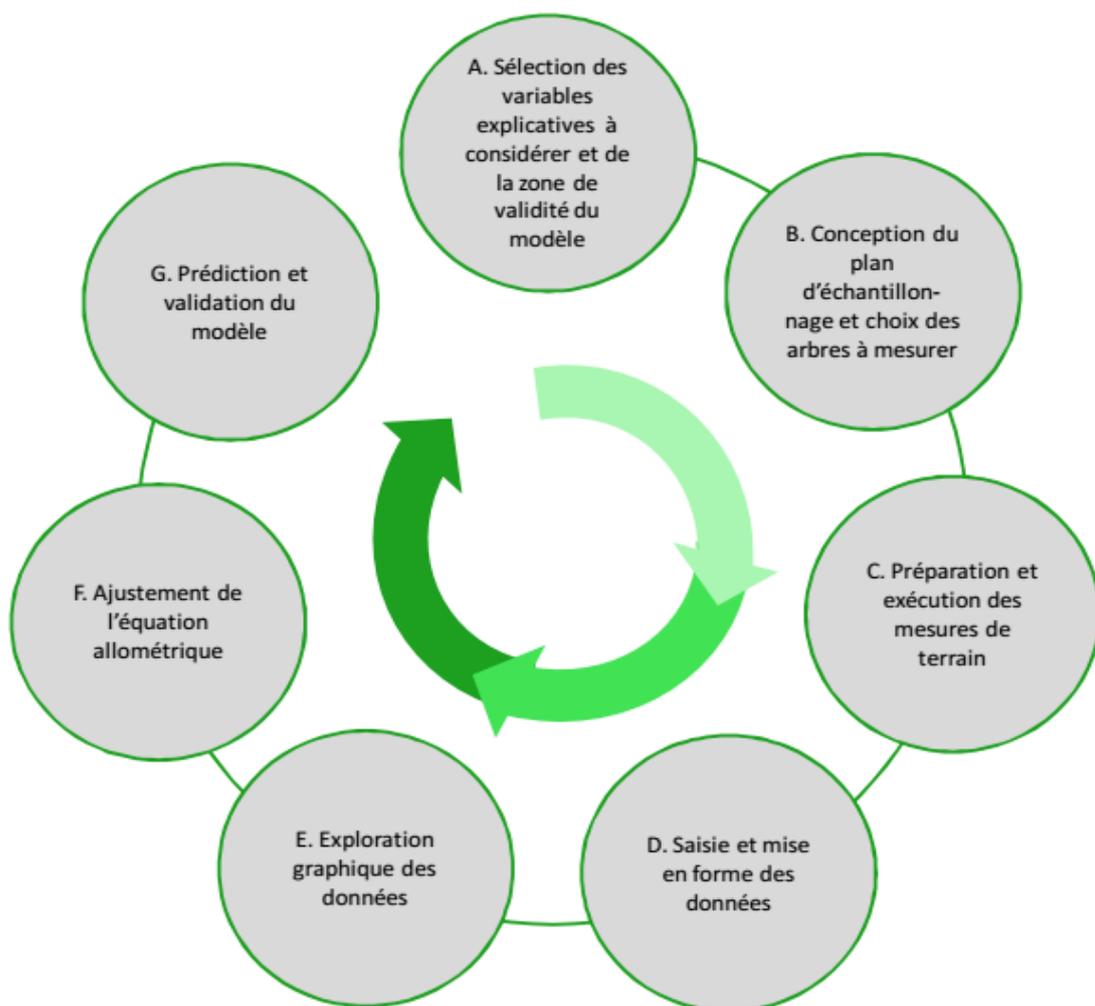


Fig. 4. Différentes étapes nécessaires pour le développement des équations allométriques (Picard et *al.*, 2012).

I.5.1.3. Variables de l'arbre

Le diamètre à hauteur de poitrine (dhp, en cm), la densité du bois (ρ , en g.cm^{-3}) et la hauteur totale (H, en m) sont des variables explicatives des équations allométriques les plus couramment utilisées pour le développement des équations allométriques nécessaires pour la prédiction de la biomasse des arbres sur pied (Brown et *al.*, 1989, 1997 ; Chave et *al.*, 2005 ; Djomo et *al.*, 2010, 2016 ; Fayolle et *al.*, 2013 ; Ngonmanda et *al.*, 2014). Certaines variables ont récemment été introduites dans les modèles tels que le diamètre de la couronne (Xu et *al.*, 2015 ; Ploton et *al.*, 2016), la surface terrière de l'arbre (Henry et *al.*, 2010) et l'indice climatique noté « E » qui tient compte des conditions environnementales qui règnent dans un milieu donné (Chave et *al.*, 2014).

I.5.1.3.1. Diamètre de l'arbre

Le diamètre de l'arbre est la variable dendrométrique la plus facilement mesurable lors des études d'inventaire (Brown *et al.*, 1989). il est le plus souvent mesuré de façon directe à 1 m 30 au-dessus du sol à l'aide d'un dhp mètre. Pour les espèces possédant les contreforts, cette variable se mesure à 30 cm au-dessus des contreforts (Zapfack *et al.*, 2016). Toutefois, cette variable peut être déterminée de façon indirecte à l'aide des appareils de mesure comme le Relaskope bitterlich (Massenet, 2011). C'est la variable la plus importante dans la prédiction de la biomasse forestière car beaucoup d'auteurs ont montré que le pourcentage de prédiction avec cette seule variable peut même dépasser 90 % au vu du coefficient de corrélation détermination (R^2) (Brown *et al.*, 1989 ; Basuki *et al.*, 2009 ; Djomo *et al.*, 2016). Les modèles allométriques développés à partir de ce diamètre comme seul prédicteur (Brown *et al.*, 1989) ont été longtemps utilisés pour l'estimation de la biomasse. Or certains auteurs pensent que même si les modèles obtenus à partir de ce prédicteur donnent des meilleurs ajustements, cette variable seule ne suffit pas pour une meilleure estimation de la biomasse à l'échelle de l'arbre (Basuki *et al.*, 2009 ; Chave *et al.*, 2005).

I.5.1.3.2. Hauteur de l'arbre

La prédiction des stocks de carbone peut être surestimée si on ignore la variable hauteur de l'arbre (Noguiera *et al.*, 2005 ; Ngomanda *et al.*, 2014). En milieu forestier, essentiellement en zone tropicale, bien que la hauteur de l'arbre soit un bon prédicteur de la biomasse, il est généralement difficile de faire des mesures directes compte tenu de la complexité et la diversité des strates qui constituent cet écosystème forestier (Djomo, 2015a). De plus, il nécessite beaucoup de temps, d'énergie et de moyens financiers. De ce fait, Korhonen *et al.* (2006) et Djomo (2015a) recommandent l'usage des méthodes indirectes pour sa mesure telles que les méthodes dendrométriques (principe de Pythagore), régressions linéaires, etc., ou alors en utilisant certains appareils tels que le Relaskope de Bitterlich, le SUNTO, le Vertex, etc. (Massenet, 2011). Dans le cas précis du Relaskope par exemple, le principe de mesure de la hauteur des arbres se fait suivant le principe de trigonométrie (théorème de Pythagore), tenant compte du pourcentage de la pente formée par rapport à l'horizontal.

I.5.1.3.3. Diamètre de la couronne

Pour l'établissement des équations allométriques, la plupart des études utilisent les variables telles que le diamètre, la hauteur et la densité du bois pour la prédiction de la

biomasse. Cependant, Henry *et al.* (2010), Goodman *et al.* (2014), Korhonen *et al.* (2006), Xu *et al.* (2015), Ploton *et al.* (2016) et Djomo & Chimi (2017) ont montré l'importance de l'introduction du diamètre de la couronne dans les modèles pour la prédiction de la biomasse forestière surtout en rapport avec son application potentielle dans les études de télédétection (Lu *et al.*, 2016). Pour Ploton *et al.* (2016), le diamètre de la couronne aide à résoudre les problèmes liés aux équations allométriques courantes en réduisant les erreurs dans l'estimation de la biomasse. Elle correspond à la surface occupée par la couronne assimilable à un cône à base pentagonale (Fuentes *et al.*, 2015). L'imagerie satellitaire à haute résolution est un outil permettant de mesurer de façon plus précise le diamètre de la couronne. Elle peut aussi se mesurer à l'aide du SUNTO et du décamètre. Ainsi, en supposant le tronc comme le centre de cette couronne, son diamètre peut être mesuré suivant les orientations Nord-Sud, Est-Ouest, Nord-Est/Sud-Ouest et Nord-Ouest/Sud-Est afin d'avoir une valeur moyenne plus précise (Djomo & Chimi, 2017).

I.5.1.3.4. Densité du bois

La densité du bois est le rapport de la masse anhydre ou à une teneur en humidité spécifique d'un échantillon sur la masse d'un volume d'eau égal au volume de l'échantillon (Fearnside 1997 ; Djomo, 2015a). C'est une variable clé de l'arbre dans les cycles de carbone et dans l'estimation de la biomasse (Nogueira *et al.*, 2005).

Cette variable peut être mesurable en employant différentes méthodologies (Lindren, 1991 ; Rabier *et al.*, 2006 ; Via *et al.*, 2011), parmi lesquelles la plus utilisée pour les échantillons fraîchement prélevés obéit au principe d'Archimède (Fearnside, 1997). On distingue plusieurs types de densité du bois à savoir : la densité apparente qui est le rapport entre le poids et le volume à un taux d'humidité donné, la densité verte qui est le rapport poids frais / le volume frais, la simple gravité spécifique qui est le rapport poids sec / volume sec et la densité basique qui est le rapport du poids sec sur le volume du bois frais ; elle est obtenue par le principe d'Archimède (Nogueira *et al.* 2005). Elle est la plus recommandée dans les études d'estimation de biomasse car les valeurs de densité obtenues par cette méthode sont plus fiables (Fearnside, 1997 ; Nogueira *et al.*, 2005 ; Djomo *et al.*, 2010 ; Henry *et al.*, 2010).

I.5.1.3.4.1. Importance de la densité du bois dans les estimations de biomasse

Compte tenu de l'importance de la densité du bois pour l'estimation de la biomasse des arbres et pour minimiser les incertitudes dans l'estimation des stocks de carbone (Wiemann & Williamson, 1989 ; Fearnside, 1997 ; Nogueira *et al.*, 2005 ; Chave *et al.*, 2014 ;

Djomo et *al.*, 2016 ; Ploton et *al.*, 2016), Fearnside (1997), et Chave et *al.* (2006) ont mis en évidence la nécessité de développer des bases de données de densité du bois pour faciliter l'estimation de la biomasse en zone tropicale. Pour Baker et *al.* (2004), établir des équations allométriques sans tenir compte des variations de densité rend les résultats globaux de prédiction de la biomasse aérienne médiocres. C'est dans ce sens que tenant compte des données collectées dans tous les continents du monde, la densité du bois de plus de 8000 espèces sont actuellement disponibles dans « Global Wood Density » (Zanne et *al.*, 2009). Cet effort nécessite d'être poursuivi pour de nombreuses autres espèces dont les données ne sont pas disponibles dans cette base de données (Henry et *al.*, 2010 ; Ngoukwa, 2016).

I.5.1.3.4.2. Variation de la densité du bois

Zanne et *al.* (2009) ont utilisé 8413 espèces pour démontrer qu'il existe une variation interspécifique de la densité du bois ; en effet, cette densité varie de 0,08 à 1,39 g/cm³. De plus, considérant la variation intraspécifique, pour une espèce donnée, la densité varie selon le milieu où elle se trouve (Reyes et *al.*, 1992 ; Zanne et *al.*, 2009). Ainsi, dans un milieu donné, la densité varie en fonction des individus et pour un même individu, elle varie de la base vers les branches et de l'écorce vers le cœur de l'arbre (Wiemann & Williamson, 1989 ; Fearnside, 1997 ; Baker et *al.*, 2004 ; Noguiera et *al.*, 2005 ; Henry et *al.*, 2010 ; Ngoukwa, 2016 ; Djomo et *al.*, 2017). Sachant par exemple que la variation de la densité de bois en fonction des compartiments de l'arbre influence de la même façon la biomasse stockée par ces différents compartiments, l'utilisation de la valeur de la densité mesurée à partir d'un seul point sur l'arbre pour estimer la biomasse d'un autre compartiment ou de tout l'arbre, ne prendrait pas en compte ces variations (Baker et *al.*, 2004). Pour Noguiera et *al.* (2005) une surestimation de 4,3 % existe entre la densité du bois mesurée à hauteur de poitrine et la densité du bois moyenne de tout l'arbre ; ce qui aurait un impact direct sur la biomasse prédite.

I.5.1.4. Test de sélection des meilleures équations pour la prédiction

Les variables explicatives et la biomasse des arbres une fois collectées, sont utilisées pour établir des équations allométriques (Brown et *al.*, 1987 ; Djomo & Chimi, 2017). Celles-ci commencent par des explorations graphiques nécessaires pour le choix des modèles à établir (Picard et *al.*, 2012). Une fois les modèles définis à partir des coefficients de

détermination, plusieurs tests supplémentaires peuvent être utilisés pour choisir le meilleur modèle de prédiction (Djomo, 2015a). Ces tests statistiques sont présentés dans le tableau I.

Le coefficient de corrélation de détermination (R^2) est le test le plus utilisé. Il permet de donner la force (lien) qui existe entre deux variables car permet de mesurer la réduction dans la variation totale des variables dépendantes due aux multiples variables indépendantes. Toutefois, sa valeur ajustée (R^2 .Adj.) se préfère car elle prend en compte l'augmentation du nombre de variables indépendantes (Djomo, 2015a).

Pour Chave et *al.* (2005) et Djomo (2015a) le coefficient de détermination ajusté (R^2 .Adj.), le Critère d'Information d'Akaike (AIC) et le RSE à eux seuls peuvent être utilisés pour le choix du meilleur modèle car ils permettent de comparer deux modèles.

Fayolle et *al.* (2013) et Djomo et *al.* (2016) pour leur part, pensent qu'en plus de l'AIC et du RSE, l'erreur moyenne (%) et le « Relative Root Mean Square Error » (RRMSE) doivent être prises en compte pour choisir le meilleur modèle de prédiction.

Pour Djomo (2015a) et Djomo & Chimi (2017), une autre approche pour valider un meilleur modèle est d'utiliser le résumé descriptif du jeu de données (biomasse mesurée) pour comparer à la biomasse totale, moyenne, le ratio (biomasse estimée/biomasse observée), minimum et maximum estimé à partir des différentes équations.

Tableau I. Critères/tests utilisés pour choisir un meilleur modèle de prédiction

Tests statistiques	Description	Meilleur modèle
p-value	Donne le degré de significativité du modèle	Plus proche de 0
R ² ajusté	C'est une variante du R ² . Sur la base du coefficient de Pearson, il exprime le niveau de corrélation existant entre les deux variables.	Le plus proche de 1
R ² multiple	C'est une variante du R ² . Sur la base du coefficient de Pearson, il exprime le niveau de corrélation existant entre les deux variables ou plus.	Le plus proche de 1
AIC (Critère d'Information d'Akaike)	Critère général s'appliquant à tout modèle estimé par le maximum de vraisemblance	Le plus faible
BIC (Critère d'Information Bayésien)	Retient moins de variable que l'AIC	Le plus faible
PRESS (« leaves out-one »)	Evalue la qualité de prédiction par retrait des observations l'une après l'autre	Minimum
RSE (« Relative Square error »)	Erreur moyenne standard du modèle	Plus faible
RRMSE (« Relative Root Mean Square Error »)	Différence du carré de la biomasse observé par celui de la biomasse estimé par le modèle	Plus faible
Erreur moyenne (%)	Différence entre la biomasse observée par celui de la biomasse estimée par le modèle ×100	Plus proche de 0

I.5.1.5. Limites des équations allométriques

L'une des grandes sources d'incertitude dans les estimations des stocks de carbone dans les forêts tropicales est le manque de modèles standards pour convertir les différentes mesures dendrométriques de l'arbre en biomasse (Chave et *al.*, 2005 ; Moundounga et *al.*, 2014 ; Panzou et *al.*, 2016). La plus importante source d'erreur dans l'estimation de la biomasse est actuellement liée au choix de l'équation allométrique (Chave et *al.*, 2005 ; Picard et *al.*, 2015). Basuki et *al.* (2009) ont montré que les équations allométriques spécifiques à une espèce ou un groupe d'espèces développées à partir des données collectées

dans une localité spécifique sont plus précises que les équations générales développées à partir des données collectées dans divers milieux/écosystèmes ou dans des conditions climatiques ou végétations différentes. Toutefois, face à l'absence des équations allométriques dans une zone donnée, on est souvent contraint d'utiliser des équations allométriques générales ou encore des équations pantropicales dont certaines n'ont pas pris en compte par exemple les données de l'Afrique tropicale (Chave *et al.*, 2005). Henry *et al.* (2011) signalent que pour l'ensemble des équations allométriques disponibles en 2010, environ 22 % de celles-ci ne sont pas fiables pour estimer la biomasse.

Pour Moundounga *et al.*, (2014) et Picard *et al.* (2015), en Afrique tropicale, il a été montré que le choix de l'équation allométrique contribue à environ 76 % à l'erreur totale dans les estimations de la biomasse de l'arbre.

Les équations développées par Chave *et al.* (2005) sont communément utilisées pour estimer la biomasse forestière en zone pantropicale même si ces données ne prennent pas en compte les données de l'Afrique. Djomo *et al.* (2016) ont récemment développé des équations pantropicales adaptées pour l'Afrique tropicale à partir des données collectées dans 5 pays d'Afrique à savoir : le Cameroun, Gabon, Ghana, Madagascar et République Démocratique du Congo. De même, les travaux de Djomo & Chimi (2017) ont permis de confirmer l'utilisation de l'équation de Djomo *et al.* (2016) pour les forêts du Cameroun en l'absence d'équation spécifique à la zone d'étude.

Pour Molto *et al.* (2013) et Panzou *et al.* (2016), l'erreur d'estimation de la biomasse de l'arbre peut être décomposée en trois catégories :

- l'erreur due au choix de l'équation allométrique ;
- l'erreur de prédiction du modèle qui comprend l'incertitude sur les coefficients du modèle et l'erreur résiduelle du modèle ;
- l'erreur sur les prédicteurs qui comprend les erreurs de mesure des variables dendrométriques (diamètre, hauteur, etc.) et celles relatives à la densité du bois, liées à la détermination de l'espèce, aux mesures en laboratoire ou à la variabilité intra-spécifique.

I.5.2. Facteur d'expansion forestier et Ratio

Outre les équations allométriques qui sont le plus souvent utilisées pour estimer la biomasse des arbres, l'évaluation de la biomasse dans les forêts peut aussi être estimée à partir des données d'inventaires forestiers en utilisant les facteurs d'expansion de biomasse (FEB).

La particularité de ce facteur est qu'il peut être utilisé pour l'estimation de la biomasse à l'échelle locale, nationale ou même régionale (Peterson et *al.*, 2012 ; Enes & Foncesa, 2014).

Toutefois, leur détermination requiert au préalable comme dans le cas des équations allométriques, la méthode destructive pour l'évaluation du volume/biomasse des différents compartiments de l'arbre lesquels sont ensuite utilisés pour la détermination du FEB (Tobin & Nieuwenhuis, 2007 ; Giri et *al.*, 2014).

Le facteur d'expansion de biomasse est selon Levy et *al.* (2004) et Sanquetta et *al.* (2011), le rapport volume/biomasse épicée totale de l'arbre (tronc, branches, feuilles) sur le volume/biomasse du fût ($FEB = M_{total}/M_{fut.}$).

$$FEB = \frac{M_{bo} + M_{cr}}{M_{bo}} = \frac{M_{ag}}{M_{bo}}$$

Avec M_{bo} = masse/volume du fût (kg), M_{cr} = masse de la couronne (kg), composée de feuilles et branches; $M_{ag} = M_{cr} + M_{bo}$ (kg) est la biomasse épicée.

Ainsi, sur la base des données d'inventaire, la biomasse épicée peut être déterminée par la formule suivante : Biomasse épicée = $V * \rho * FEB$. V = volume/ha, ρ = densité du bois et FEB = facteur d'expansion de biomasse. De même, la biomasse hypogée = $V * \rho * R$

Le ratio (R) quant à lui est le rapport entre la biomasse hypogée sur la biomasse épicée totale.

$$R = \frac{M_{be}}{M_{ag}}$$

Avec M_{be} = biomasse hypogée et M_{ag} = biomasse épicée

Comme l'a montré Sanquetta et *al.* (2011), le FEB et le ratio varient largement suivant l'espèce d'arbre considérée et par conséquent, l'usage d'une valeur moyenne pour les arbres est souvent source d'erreur. Ainsi, l'utilisation de la constante pour chaque espèce réduirait les erreurs d'estimation de la biomasse en comparaison à la valeur moyenne (Levy et *al.*, 2004). En effet, les arbres ont le plus souvent des architectures différentes, lesquelles ont un impact sur leur biomasse (Goodman et *al.*, 2014). Toutefois, dans les écosystèmes très diversifiés comme celui des forêts d'Afrique centrale, il est le plus souvent recommandé l'utilisation de la valeur moyenne lorsque la valeur spécifique à chaque arbre de ces constances ne sont pas disponibles (Brown et *al.*, 1989, Mokany et *al.*, 2006).

I.5.3. Données sur les stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers

De grandes quantités de carbone sont séquestrées dans les écosystèmes forestiers tropicaux (Lewis *et al.*, 2009). Pour certains auteurs, les forêts tropicales stockent en moyenne 202 t C/ha avec une variation importante selon le type d'écosystème ou la zone où ces stocks ont été mesurés (Anonyme, 2011b). Dans le cas des écosystèmes forestiers du Cameroun en particulier, au vu des publications consultées, les quantités de carbone stockées varient de 100 à plus de 300 tC/ ha (e.g. Lewis *et al.*, 2009 ; Djuikouo *et al.*, 2010 ; Zapfack *et al.*, 2013 ; Noiha *et al.*, 2015 ; Tabue *et al.*, 2016 ; Chimi *et al.*, 2018).

A l'échelle de l'arbre, la biomasse est inégalement répartie dans les différents compartiments (Locatelli, 2005 ; Vahedi *et al.*, 2014). Dans une étude récente, Ploton *et al.* (2016) ont montré que la contribution de la canopée des arbres à la biomasse épigée totale varie de 2,5 à 87,5 % avec une moyenne de 35,7 %. La plupart des études de biomasse se limitent à la biomasse épigée au détriment de la partie de la biomasse souterraine à cause de difficultés liées à son extraction du sol. Pourtant, les racines des arbres en plus de jouer un rôle important dans la dynamique des écosystèmes de forêt stockent des quantités de carbone considérables (Helmisaari *et al.*, 2007 ; Malinosvki *et al.*, 2016). Pour Green *et al.* (2004) et Mokany *et al.* (2006), la biomasse hypogée représente environ ¼ de la biomasse épigée. Pour Locatelli (2005) les racines contribuent environ à 15 % à la biomasse totale.

Les travaux de Locatelli (2005) dans les forêts tropicales humides d'Afrique centrale, ont permis de quantifier les stocks de carbone à l'hectare selon les compartiments de l'arbre y compris la végétation basse, la litière et le bois mort. Il ressort des travaux de cet auteur que : les stocks de carbone totaux forestiers sont estimés à 350 t C/ ha soit 100 t C/ha pour les sols, 30 t C/ha pour la biomasse hypogée et 220 t C/ha pour la partie épigée. En se limitant uniquement à la partie épigée, le stock du tronc est estimé à 120 t C/ha et celui de la canopée (branches + feuilles) à 80 t C/ha. La végétation basse (sous-bois) et le bois sec + la litière stockent chacun 10 t C/ha (Fig. 5).

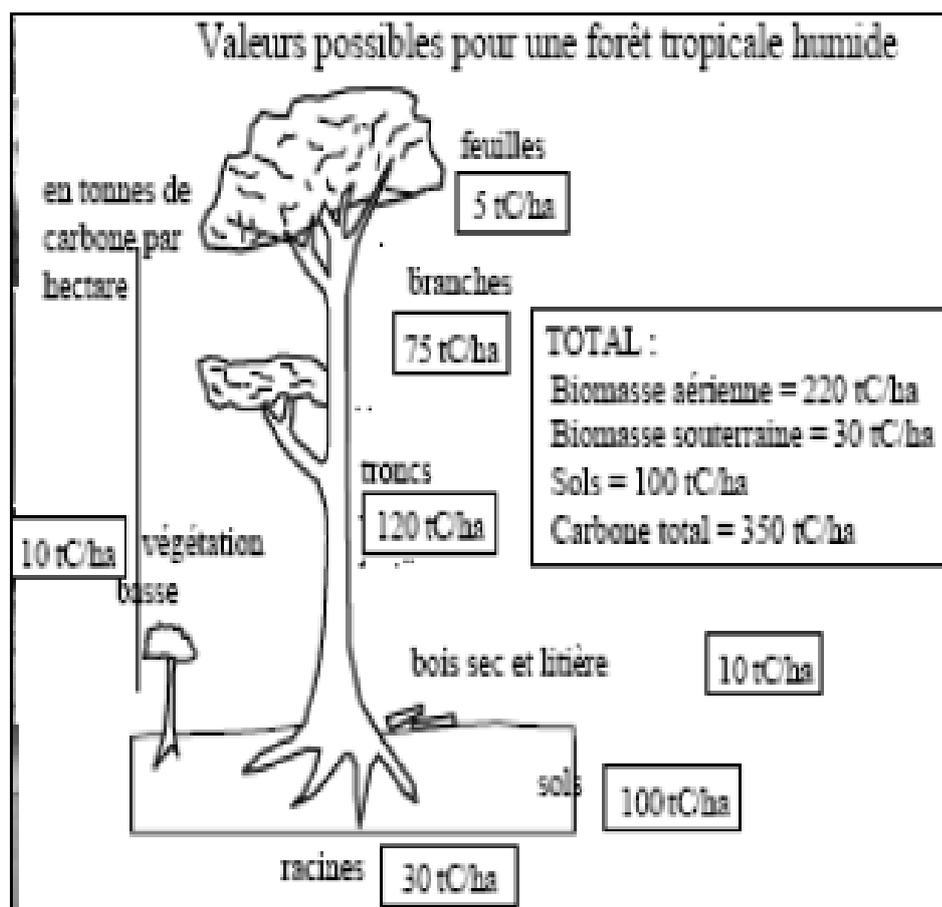


Fig. 5. Répartition des stocks de carbone forestier par compartiment (Locatelli, 2005).

I.6. Présentation de la zone d'étude

I.6.1. Situation géographique

L'Unité Forestière d'Aménagement (UFA) 10 065 qui s'étend sur une superficie de 97 123 ha est située dans l'Arrondissement de Belabo (une petite superficie de cette UFA se trouvant dans l'Arrondissement de Mandjou), Département de Lom et Djérem de la Région de l'Est Cameroun (Anonyme, 2012). Cette UFA qui a connu une forte exploitation entre 1977 et 1996 sous la période d'activité de la SOFIBEL (Société Forestière et Industrielle de Belabo), est de nos jours selon le Décret n°2014/0057/PM du 05 Février 2014 administrée par la société «La Côtière Forestière». L'UFA 10 065 est délimitée au Nord par le Parc National de Deng Deng, au Sud par l'UFA 10-061 appartenant à la société Placage du Cameroun (PLACAM) et la Société Forestière et Industrielle de la Lekoundje (SFIL) respectivement, à l'Est par la route Batouri (Kobi)-Yokadouma et à l'Ouest par l'UFA 10-052 appartenant à la SFIL (Fig. 6).

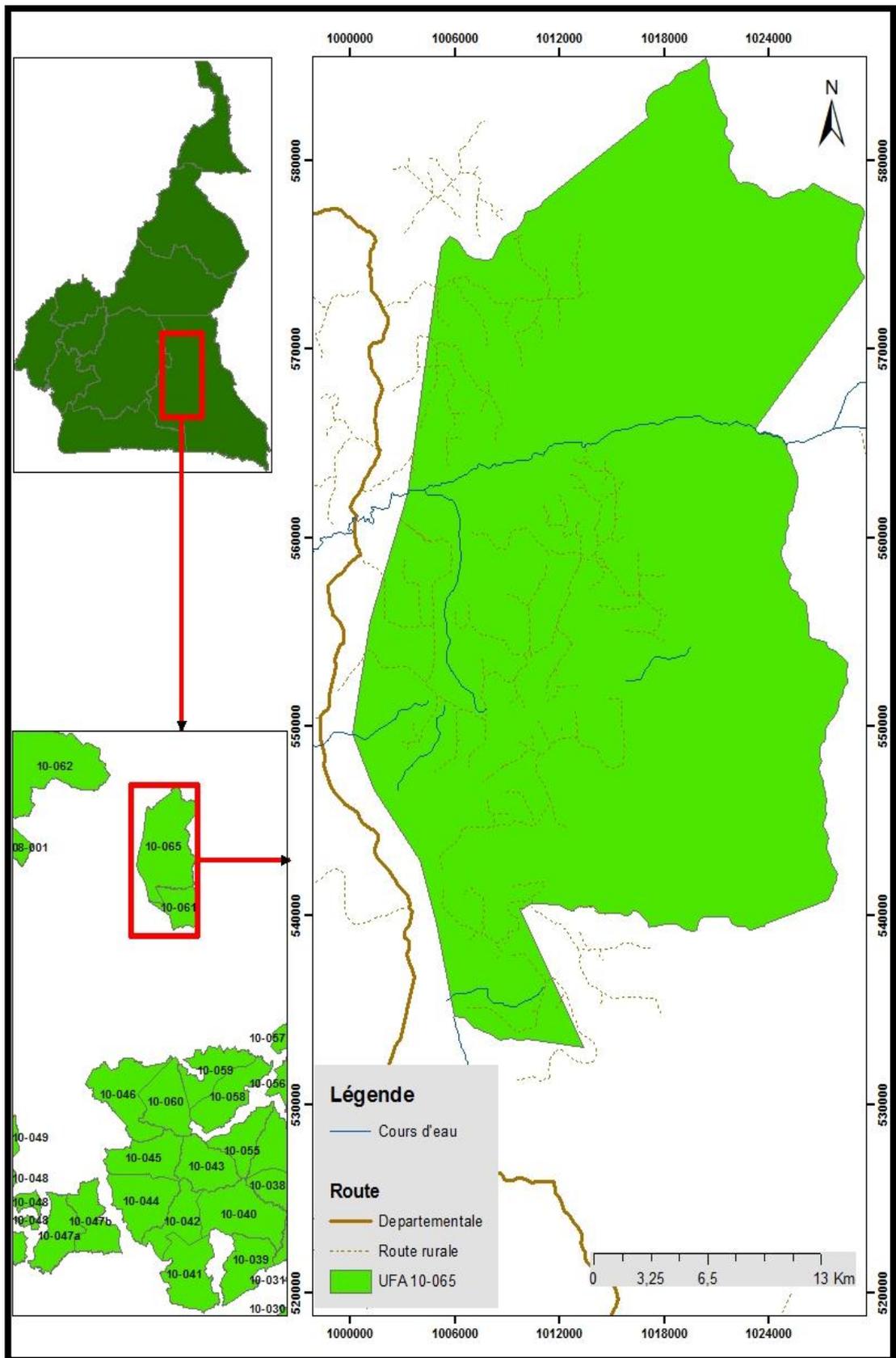


Fig. 6. Situation géographique de l'unité forestière d'aménagement 10 065 dans la Région de l'Est Cameroun

I.6.2. Milieu biophysique

I.6.2.1. Climat

Le climat qui prévaut dans la commune de Belabo est le même dans toute la région de l'Est Cameroun. Il est équatorial de type guinéen à quatre (04) saisons d'inégales répartitions, alternant entre deux saisons sèches et deux saisons de pluies ; réparties comme suit (Ngoukwa, 2016) :

- une petite saison de pluie qui s'étend de mars à juin ;
- une petite saison sèche qui va de juin à août ;
- une grande saison de pluie qui va de mi-août à octobre ;
- une grande saison sèche qui va de mi-octobre à mars.

La température est élevée tout au long de l'année, avec un maximum pouvant atteindre 30° C (Janvier-Février) et un minimum de 20°C entre Juillet-Août ; la moyenne oscillant entre 23° C et 25° C. Les pluies sont abondantes et bimodales. Selon les données de pluviométries collectées par STAT N°16-DESA/AGR/MINADER/- en 2008, la hauteur maximale des précipitations annuelles est de 2438 mm et la moyenne annuelle est de 1816 mm. Cependant, la localité n'est pas épargnée par les impacts du réchauffement climatique et l'équilibre pluviométrique connaît parfois de sérieuses perturbations impactant ainsi sur le calendrier agricole de la zone (Anonyme, 2012).

I.6.2.2. Relief et sols

Sur le plan géographique, la commune de Belabo appartient en partie au plateau Sud Camerounais, tenant son originalité des différents mouvements tectoniques qui ont eu lieu aux temps géologiques. Le relief dans cette zone est assez diversifié et relativement peu accidenté, laissant apparaître comme particularité des petites collines de faible altitude dont la moyenne se situe entre 600 et 750 mètres. Ces collines sont séparées de vallées qui servent de lits à la plupart des rivières qui traversent ladite commune pour se jeter dans la Sanaga (Ngoukwa, 2016).

La roche mère est essentiellement constituée de granite et de gneiss à l'Est de l'UFA et des roches métamorphiques à l'Ouest (Moby et *al.*, 1979). Ces roches sont la plupart du temps exploitées comme gravier pour les constructions infrastructurelles. Les sols quant à eux, meubles, fertiles et complétés au type de climat qui y règne sont propices pour la mise en valeur d'une agriculture diversifiée biannuelle. Ces sols sont essentiellement de type ferrallitique rouge et jaune avec une structure caractérisant la présence des blocs rocheux

recouverts d'un manteau latéritique de roches altérées. On y trouve également dans les plaines des sols argilo-sablonneux ou argilo-limoneux avec par endroits une cuirasse latéritique. Pour les sols hydromorphes, riche en sédiments organiques, on les rencontre essentiellement dans les zones marécageuses et aux abords des cours d'eaux (Anonyme, 2012).

I.6.2.3. Hydrographie

La commune de Belabo où se situe l'UFA 10 065 est traversée par le fleuve Sanaga et ses affluents. Cette commune est animée d'un régime de fleuves et de rivières très denses. Toutefois, compte tenu de l'intensité de la grande saison sèche, de nombreux ruisseaux et marigots tarissent pendant cette saison (Anonyme, 2012).

I.6.2.4. Flore

La flore de la commune de Bélabo est essentiellement constituée de la forêt dense et de la savane arborée parsemée de forêts galeries. C'est une forêt de type semi-caducifoliée à Ulmaceae et Sterculiaceae appartenant à la région floristique guinéo – congolaise (Letouzey, 1985). Cette commune est toutefois proche de la limite forêt – savane et présente des unités phytogéographiques relevant de deux sous-ensembles : le secteur guinéo-soudanien avec ses différents faciès de savane, et le secteur forestier semi-caducifolié.

Parlant du secteur semi-caducifolié où est située l'UFA 10 065, la végétation présente une diversification d'espèces avec une stratification complète allant de la strate herbacée à la strate arborescente supérieure. Selon Anonyme (2012), on en dénombre environ 80 espèces exploitables dont quelques-unes sont présentées dans le tableau II.

Tableau II. Principales essences exploitées rencontrées dans la zone (Anonyme, 2012)

Noms de l'essence	Nom scientifique	Famille	Tendance
Ayous	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	Malvaceae	Abondante
Bété	<i>Mansonia altissima</i>	Malvaceae	Abondante
Abalé	<i>Pertersianthus macrocarpus</i>	Lecythidaceae	Moyenne
Iroko	<i>Milicia excelsa</i>	Moraceae	Moyenne
Fraké	<i>Terminalia superba</i>	Combretaceae	Moyenne
Kossipo	<i>Etandrophragma candolei</i>	Meliaceae	Moyenne
Moabi	<i>Baillonella toxisperma</i>	Sapotaceae	Moyenne
Sapelli	<i>Entandophrama cylindricum</i>	Meliaceae	Moyenne
Padouk	<i>Pterocarpus sayauxii</i>	Fabaceae	Moyenne
Tali	<i>Erythropheum ivorensis</i>	Fabaceae	Moyenne

Les Produits Forestiers Non Ligneux (PFNL) qui sont très abondants dans ce grand massif forestier de Deng Deng sont sujets au ramassage et à la cueillette par les populations environnantes. Toutefois, leur exploitation demeure traditionnelle et artisanale et les espèces les plus concernées sont : *Ricinodendron heudelotti* (Djangsang), *Gnetum africanum* (Eru/okok), *Irvingia gaboneensis*, *Raphia* sp, etc.

I.6.2.5. Faune

La faune, très riche est de nos jours menacée à cause des actions anthropiques telles que l'exploitation du bois d'œuvre et surtout le braconnage. Toutefois, Anonyme (2012) dénombre une faune majoritairement représentée par les groupes suivants:

- mammifères : buffles, antilopes, phacochères, éléphants, biches, céphalophes ;
- primates : gorilles, singes, chimpanzés ;
- reptiles : serpents, crocodiles, pangolins,
- insectes lesquels y sont très nombreux : chenilles, criquets, papillons, etc.,
- rongeurs : hérissons, porc épic ;
- oiseaux : perroquets, perdrix, toucans, etc.

I.6.3. Activités humaines et socio-économiques

Créée en 1982, la commune de Belabo, est peuplée de 45 559 habitants lesquels sont repartis dans environ 64 villages. On y trouve plusieurs ethnies réparties en quatre grands groupes sociologiques notamment : « Bobilis », « Képere Woutchaba », « Deng-Deng » et

« Pol », qui sont les autochtones représentant les $\frac{3}{4}$ de la population et les allogènes tels que les Musulmans, les Bamoun, les Betis, les Bassa, etc. (Anonyme, 2012).

Les principales activités économiques pratiquées dans la zone sont : l'agriculture, l'exploitation forestière, l'élevage, la pêche, la chasse et le ramassage (Anonyme, 2012). Dans cette commune, l'agriculture est la principale source de revenus et d'auto-nutrition. Elle concerne essentiellement les cultures de rente telles que le cacao et les cultures vivrières (plantain, manioc, igname, macabo, maïs, etc.).

L'élevage concentré sur les volailles, les porcins et les bovins, fait partie des domaines d'activités porteuses dans la commune de Belabo. La pêche et la chasse sont des activités faites de manière artisanale. Cependant, la chasse qui est une activité porteuse dans la zone, connaît une baisse de sa rentabilité à cause de la pression des agents des eaux et forêts et aussi l'éloignement du gibier du fait de l'exploitation forestière, ce qui diminue les prélèvements de la faune sauvage (Anonyme, 2012).

L'exploitation forestière emploie une grande partie de la population. Sur la base de la carte administrative du domaine forestier au Cameroun (Anonyme, 2015), la commune de Belabo est composée de :

- 2 UFA dans le massif forestier de Deng Deng à savoir : l'UFA 10 061 (28 137 ha) exploitée par PLACAM et l'UFA 10 065 (97 123 ha) exploitée par La Côtère Forestière;
- une UFA (10 062) dans la localité de Dimong, exploitée par la société Pangeotis Marilis ;
- une forêt communale en voie de classement ;
- cinq forêts communautaires ;
- cinq ventes de coupe assignées à la Société Forestière et Industrielle de la Doumé (SFID) ;
- un Parc National à Deng-Deng pour la protection de la biodiversité d'une superficie d'environ 58 092 hectares ;
- une forêt de recherche et d'expérimentation située à Ndemba I et appartenant à l'antenne de l'Université de Dschang de Belabo.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

II.1. MATERIEL

II.1.1. Site d'étude

Cette étude a été menée dans la forêt de Deng Deng, plus précisément dans l'assiette annuelle de coupe 3.2 de l'UFA 10 065, attribuée à la société forestière « La Côtière Forestière (LCF) » depuis l'année 2014 par Décret n°2014/0057/PM du 05 février 2014. Ce site a été choisi en raison des activités d'exploitation forestière s'y déroulant pour faciliter la collecte des données destructives essentielles à la mise en place de la méthodologie.

II.1.2. Matériel utilisé

Le matériel utilisé pour la collecte des données est constitué de :

- un GPS (Global Positioning System) de marque GARMIN pour la géolocalisation des différents points d'échantillonnage ;
- un appareil photo numérique pour les différentes prises photographiques ;
- une boussole et des ficelles de 10, 20 et 25 mètres pour la formation des parcelles d'échantillonnage ;
- deux balances ; dont une à suspension pour les pesées des différents compartiments de l'arbre sur le terrain et une autre électronique sensible pour les pesées des petits échantillons liées à la mesure de la densité du bois ;
- une tarière de Pressler pour collecter les carottes de bois sur l'arbre ;
- une étuve pour le séchage des différents échantillons collectés ;
- un Dbh mètre pour mesurer le diamètre des arbres ;
- un penta décamètre de 30 m pour mesurer la longueur des arbres couchés et la surface des parcelles d'échantillonnage ;
- un Relascope de Bitterlich pour la mesure de la hauteur des grands arbres sur pied ;
- un sécateur, des papiers journaux, des planches à herbier et de l'alcool dilué à 70° pour récolter, presser, conserver et sécher les spécimens collectés ;
- des fiches de terrain, un carnet de note, des crayons et des gommes pour l'enregistrement des données acquises sur le terrain ;

- des machettes et des étiquettes.

II.2. METHODES

II.2.1. Dispositifs d'échantillonnage

Les données de terrain ont été collectées exclusivement dans le site de production/exploitation sur terre ferme de l'assiette annuelle de coupe 3.2 de l'UFA 10 065 ; dont la superficie d'exploitation selon la LCF, est d'environ 2000 hectares. La collecte de ces données s'est faite en deux principales étapes.

Les données ont été collectées suivant le dispositif d'échantillonnage utilisé par Ibrahima et *al.* (2002) et Djomo et *al.* (2010). Pour cela, les données d'inventaire des arbres de $d_{hp} \geq 10$ cm ont été collectées dans 7 parcelles de 250 x 20 m (soit une superficie échantillonnée de 3,5 ha). Des sous-parcelles de 10 x 10 m et 10 x 20 m installés au point 0 (suivant l'orientation Ouest - Est) de chaque parcelle ont permis de collecter les données relatives aux arbres de diamètre < 5 cm et compris entre 5 et 10 cm respectivement. Ainsi, 14 sous-parcelles ont été installées ; soit une superficie de 0,21 ha. Ce même dispositif d'échantillonnage a été utilisé pour la collecte des données d'estimation de la biomasse par la méthode non destructive. Afin de s'assurer d'avoir pris en compte l'hétérogénéité du milieu d'étude, ces parcelles d'inventaire ont été installées à différents points de l'assiette annuelle de coupe de façon à former un hexagone dont une parcelle centrale est le milieu de l'hexagone.

Pour l'établissement des équations allométriques, il n'y avait pas de dispositif d'échantillonnage propre pour la collecte des données de biomasse destructive des arbres de $d_{hp} \geq 10$ cm. De ce fait, elle a consisté à collecter les données suivant les activités de la société forestière en place. Cependant, les données de biomasse destructive des arbres de diamètre < 5 cm et ceux de diamètre compris entre 5 et 10 cm ont été collectées suivant le dispositif d'inventaire présenté décrit précédemment. Un total donc de 6 parcelles de 10 x 10 m (3 parcelles) et 10 x 20 m (3 parcelles) ont été échantillonnées respectivement pour les arbres de diamètre < 5 cm et compris entre 5 et 10 cm. Les lianes ligneuses n'ont pas été prises en compte dans cette étude.

II.2.2. Collecte des données d'inventaire

Les données d'inventaire pour la caractérisation floristique du site d'étude ont été collectées suivant le dispositif d'inventaire. Cette collecte des données a concerné tous les

arbres de $d_{hp} \geq 1$ cm. Ainsi, dans chacune des parcelles et sous-parcelles installées, les informations telles que les noms vernaculaires et/ou noms commerciaux ainsi que l'abondance de tous les arbres présents ont été relevés. Des échantillons d'herbier des arbres ont été collectés, pressés dans des papiers journaux puis conservés dans de l'alcool éthylique 70 °; ils ont été ensuite séchés à l'étuve une fois de retour à Yaoundé. Leur identification a été faite à l'herbier national de Yaoundé par comparaison avec les spécimens disponibles et aussi à l'aide des Flores et sur internet sur la base des caractères discriminants et des noms commerciaux relevés sur le terrain.

II.2.3. Collecte des données de biomasse destructive

II.2.3.1. Biomasse épigée

Les données de biomasse ont été obtenues sur 237 arbres de $d_{hp} \geq 1$ cm (1 – 121 cm). Les données de biomasse des individus de diamètre < 5 cm et compris entre $5 \leq d_{hp} < 10$ cm a été collectée dans sous-parcelles suivant le dispositif d'inventaire des arbres de diamètre < 10 cm présentée plus haut. Les arbres donc le diamètre variait de 10 à 50 cm collectés dans cette étude, étaient essentiellement les arbres renversés par la chute des arbres exploités, abattus par la société forestière ou alors renversés lors de la création des routes forestières, de l'ouverture des parcs à bois (Fig. 7). Ce principe a permis de réduire l'impact de cette étude sur la croissance des pieds d'arbre d'avenir en particulier et sur l'écosystème de la zone en général (Fayolle et *al.*, 2013). Les arbres de diamètre > 50 cm échantillonnés étaient essentiellement les arbres exploités par la société forestière en place.



Fig. 7. Arbres renversés pendant la création des pistes forestières ou lors de la chute des arbres exploités

Pour chaque individu d'arbre abattu ($d_{hp} < 10$ cm), outre les paramètres dendrométriques (diamètre et hauteur du tronc et de la couronne et diamètre de la couronne) mesurés avant l'abattage, les masses fraîches du tronc et de la couronne (branches et feuilles) ont été pesées séparément à l'aide d'une balance à suspension. Pour les arbres $d_{hp} > 10$ cm quand cela était possible, tout l'arbre a été découpé et les masses fraîches des différents compartiments (fût, branches et feuilles) ont été relevées (Fig. 8).



Fig. 8. Collectes des données de biomasse de différents compartiments d'arbres abattus. A : i= fût tronçonné ; ii= toutes les branches sans feuille de l'arbre découpées ; iii= feuilles.

Les biomasses de la souche, des contreforts, du tronc et des branches ont été calculées à partir des données de volumes et de densité du bois collectées sur chacun des grands arbres échantillonnés. Pour cela, des mesures de diamètre ont été effectuées à chaque intervalle de 2 m de la base de l'arbre jusqu'aux branches (Fig. 9) ; selon le principe de mesure de Basuki et *al.* (2009) et Henry et *al.* (2010).



Fig. 9. Mesure des diamètres à des intervalles réguliers de 2 m sur le tronc (a) et sur les grosses branches (b)

Pour les grands arbres qui possédaient les contreforts, les mesures de la longueur (Lb), la largeur (Wb) et la hauteur (Hb) de chaque contrefort (Fig. 10) ont permis de calculer leurs volumes (Vq).

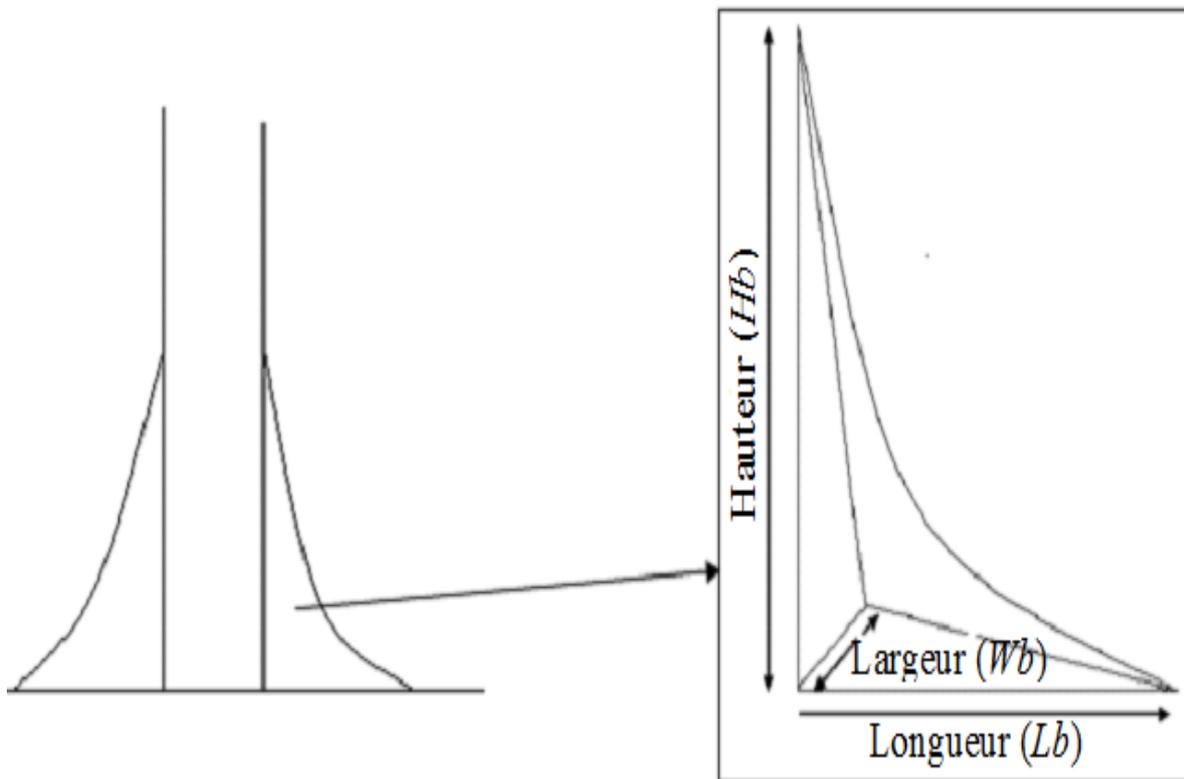


Fig. 10. Mesure de la longueur, largeur et hauteur pour chaque contrefort

Etant donné qu'il était difficile après la chute d'un arbre que toutes les branches restent intactes, soit parce qu'elles ont perdu leurs feuilles, soit parce qu'elles ont été cassées ou suspendues sur d'autres arbres voisins, leur biomasse a été estimée de façon indirecte par une méthode d'échantillonnage permettant de prendre en compte tous ces aléas. Pour cela, les branches n'ayant pas de déformation ont été directement mesurées sur le terrain, de même que leur volume et leur masse fraîche. Leur masse sèche et leur densité du bois ont été utilisées pour développer des équations allométriques spécifiques avec 18 échantillons de diamètre variant de 8 à 27 cm, pour estimer la biomasse des branches de diamètre > 8 cm. Toutes les branches de diamètre basal ≤ 8 cm ont été directement pesées sur le terrain.

II.2.3.2. Biomasse hypogée et biomasse totale

La collecte des données racinaires des grands arbres a été effectuée avec à l'aide des engins forestiers lors des activités d'exploitations forestières (Fig. 11). Pour les petits arbres le déracinement a été effectué délicatement avec l'aide des pioches. Dans chacun des cas, la terre présente sur ces racines a été délicatement retirée afin de ne pas abîmer les fines racines. Compte tenu des difficultés liées à leur déracinement et des aléas lors de l'exploitation, seulement un total de 12 arbres collectés le long des pistes forestières avaient leur partie hypogée intacte mais sans informations sur leur hauteur totale et de celle de couronne. Ces arbres ont été ajoutés dans la base de données de la biomasse hypogée. Treize (13) arbres collectés avaient tous leurs compartiments intacts (racines, tronc et couronne). Ainsi, 25 arbres dont les diamètres étaient compris entre 4 – 33 cm ont été utilisés pour développer les équations allométriques pour l'estimation de la biomasse hypogée. Treize (13) arbres de diamètre compris entre 5 -30 cm ont été utilisés pour développer les équations allométriques pour l'estimation de la biomasse totale. Pour la base des données de ces 13 arbres, le diamètre, la hauteur totale, le diamètre de la couronne et la densité du bois ont été utilisés comme variables explicatives pour le développement des équations allométriques d'estimation de la biomasse totale. Seuls le diamètre et la densité du bois ont été utilisés pour la prédiction de la biomasse racinaire.



Fig. 11. Exemple de la partie hypogée d'un arbre n'ayant subi quasiment aucun dommage lors de son déracinement

II.2.3.3. Détermination de la biomasse sèche et de la densité du bois

Pour chaque arbre échantillonné, trois à quatre sous échantillons ont été collectés au niveau des racines (dans certains cas), de la base du tronc, du tronc et des branches. Leur masse fraîche et leur volume ont été directement prélevés sur le terrain. Le volume frais a été mesuré sur la base de l'application du principe d'Archimède (Fig. 12) (Djomo et *al.*, 2010) qui correspond au déplacement de l'eau où un solide immergé dans l'eau éprouve une force ascendante égale au poids de l'eau qu'il déplace (Chave et *al.*, 2006). La balance utilisée était une balance électronique de laboratoire sensible aux faibles masses (sensibilité=0,01g). Les échantillons ont ensuite été transportés à Yaoundé puis séchés au laboratoire de Ecologie et Systématique de l'Université de Yaoundé 1 dans une étuve à 105 °C pendant 48 à 72 heures (dépendant de l'espèce) jusqu'à l'obtention de la masse constante (Ngoukwa, 2016). Cette température correspond à la température de séchage recommandée dans les études d'estimation de la densité du bois des arbres (Noguiera et *al.*, 2005).

Pour estimer la densité du bois des échantillons collectés, la masse volumique fraîche (obtenue suivant le théorème d'Archimède) et la masse sèche obtenue après séchage ont été utilisées. Ces données permettent de trouver la densité basique de l'échantillon. Cette densité est celle recommandée dans les études d'estimation de biomasse forestière (Fearnside, 1997 ; Noguiera et *al.*, 2005 ; Henry et *al.*, 2010). Compte tenu de la difficulté de mesure du volume des feuilles, leur densité n'a pas été estimée dans le cadre de cette étude (Henry et *al.*, 2010).

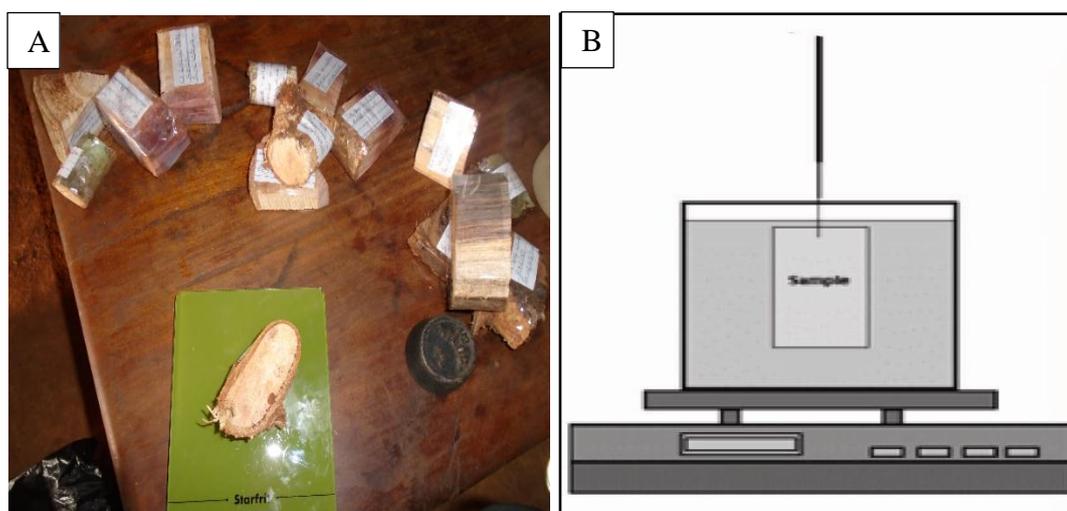


Fig. 12. Pesée des échantillons de l'arbre collecté. A= mesure de la biomasse fraîche ; B= principe de mesure de la masse volumique fraîche (Chave et *al.*, 2006).

II.2.3.4. Collecte des données dendrométriques des arbres

Pour chaque arbre, outre le nom scientifique/vernaculaire de l'arbre et la densité du bois, les paramètres dendrométriques tels que le diamètre, la hauteur totale de l'arbre, la hauteur du fût, la hauteur du houppier et le diamètre de la couronne ont été collectés. Il s'agit en fait des variables communément utilisées dans l'établissement des équations allométriques (Basuki et *al.*, 2009 ; Chave et *al.*, 2014 ; Djomo et *al.*, 2016 ; Ploton et *al.*, 2016).

Le diamètre d'un arbre est la variable la plus facilement mesurable (Brown et *al.*, 1989). Pour les arbres de $d_{hp} > 10$ cm, il a été mesuré à l'aide du dbh-mètre à 1 m 30 au-dessus du sol et 0,30 m au-dessus des contreforts pour les espèces qui en possèdent comme par exemple le *Triplochiton scleroxylon*. Pour les individus du sous-bois ($d_{hp} \leq 10$ cm), leur diamètre de référence a été mesuré à 0,3 m au-dessus du sol.

Les hauteurs des arbres, du fût et du houppier ont été obtenues par les mesures directes sur les arbres abattus à l'aide d'un pentadécamètre.

Le diamètre de la couronne/houppier de l'arbre a été obtenu à partir de la moyenne des 4 diamètres de couronne mesurés sur l'arbre sur pied en supposant le tronc de l'arbre comme le centre de cette couronne, supposée elle-même circulaire. Ainsi, en se servant de la boussole, les 4 diamètres avaient pour orientations : Nord/Sud, Est/Ouest ; Nord-Est/Sud-Ouest et Nord- Ouest/ Sud-Est (Fig. 13). Le clinomètre a permis de marquer les extrémités de la canopée suivant ces orientations. Seuls les arbres donc leur canopée était facilement mesurable du point de vue visibilité ont été considérés dans cette étude.

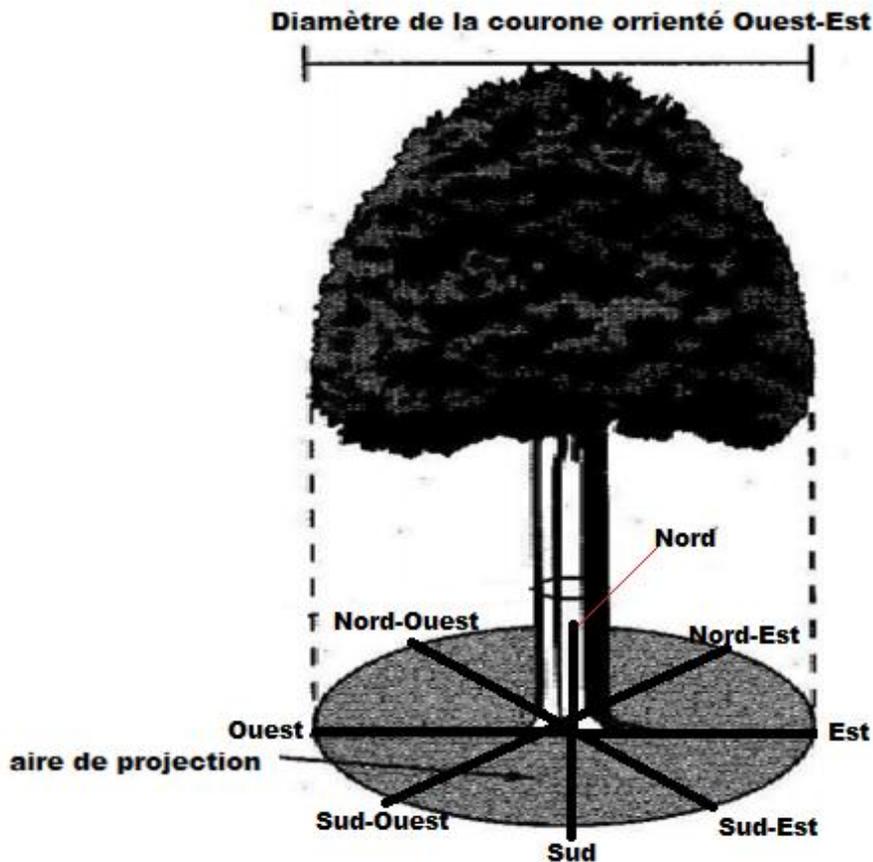


Fig. 13. Mesure du diamètre de la couronne de l'arbre (exemple pour l'orientation Ouest-Est)

II.2.4. Collecte des données d'estimation de la biomasse

Les données d'estimation de la biomasse forestière des arbres de diamètre ≥ 1 cm ont été collectées suivant le dispositif d'inventaire décrit précédemment. Ainsi, dans chaque parcelle et sous-parcelle, le diamètre et la hauteur des arbres inventoriés ont été collectés. Le diamètre a été mesuré à 30 cm au-dessus du sol pour les arbres de diamètre < 10 cm, à 1,30 cm au-dessus du sol pour les arbres de diamètre ≥ 10 cm et à 30 cm au-dessus des contreforts pour les arbres qui en possédaient (Djomo et *al.*, 2010). La mesure de la hauteur des arbres a été effectuée par des mesures directes pour les petits arbres et des mesures indirectes à l'aide du Relaskope pour les grands arbres (Fig. 14).

Pour l'arbre de la figure 14, placé à une distance horizontale de 30 m, la pente (en pourcentage) mesurée à l'aide du Relaskope à la base de l'arbre est de -5% , à la base du houppier est de $+10\%$ et au sommet du houppier est de $+70\%$. Dans ce cas, la hauteur du fût est donnée par la formule de Massenet (2011) suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Hauteur fut (B)} &= (+10 - (-5))/100 \times 30 \text{ m} \\
 &= 4,5 \text{ m} \\
 \text{Hauteur de la couronne (A)} &= (+70 - (+10))/100 \times 30 \text{ m} \\
 &= 18 \text{ m} \\
 \text{Hauteur totale} &= (+70 - (-5))/100 \times 30 \text{ m} \\
 &= 22,5 \text{ m} \quad \text{ou} \\
 \text{Hauteur totale} &= \text{hauteur du fût} + \text{hauteur de la couronne} \\
 &= 4,5 \text{ m} + 18 \text{ m} \\
 &= 22,5 \text{ m}
 \end{aligned}$$

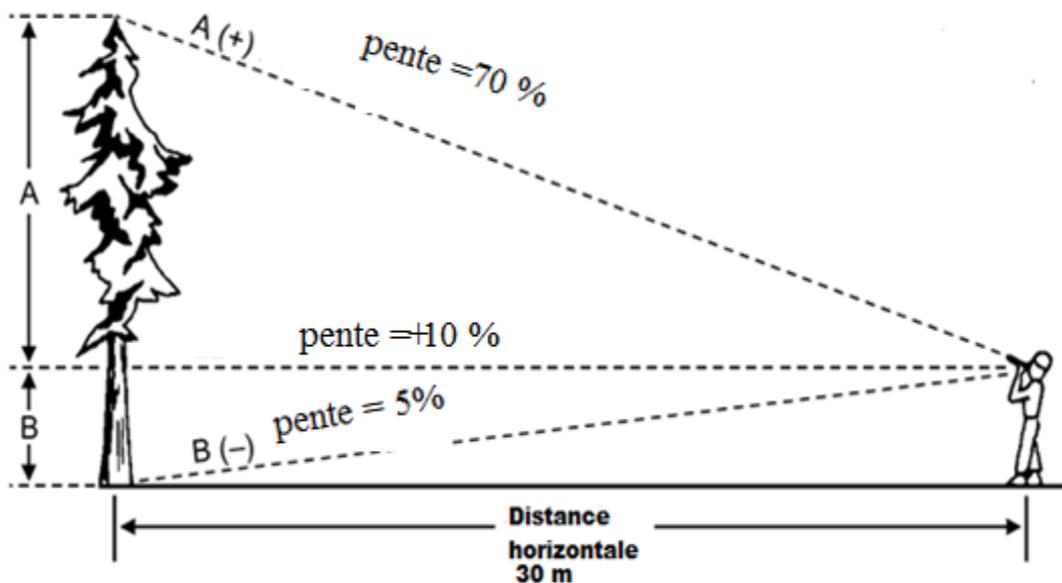


Fig. 14. Technique de mesure indirecte de la hauteur de l'arbre à l'aide du Relaskope sur la base des pourcentages des pentes obtenues à différents points (Massenet, 2011).

La densité du bois de chaque espèce a été déterminée au cours de cette étude. Pour les espèces dont les données de densité de bois n'étaient pas disponibles, les valeurs de densité du bois de "Global Wood Density Data Base" ont été utilisées (Zanne et al., 2009). Pour les autres espèces dont les données de densité du bois ne sont pas disponibles dans la littérature, par défaut la valeur moyenne de la densité de tous les arbres inventoriés a été utilisée (Henry et al., 2010).

Les données d'inventaire ont été utilisées pour estimer la biomasse forestière du massif en les combinant avec les équations allométriques développées au cours de cette étude (Djomo & Chimi, 2017).

II.2.5. Collecte des données de détermination de la teneur en carbone forestière

La tarière de Pressler a été utilisée pour la collecte des données de quantification de la teneur en carbone (% contenu dans la biomasse sèche). Pour cela, des carottes d'environ 40 g ont été collectées au niveau du tronc et des branches de 19 arbres (afin de tenir compte de la variation verticale sur l'arbre). Un total de 80 échantillons a été collecté et utilisé pour déterminer la teneur en carbone (%).

Les teneurs en carbone (%) contenues dans la biomasse ont été évaluées dans le laboratoire «Queen's Facility for Isotope Research» du département des Sciences Géologiques de l'Université Queen's du Canada. Ainsi, après séchage de ces échantillons, chaque carotte a été subdivisée en 3 sous échantillons (de l'écorce vers le cœur de l'arbre) d'environ 10 g afin de prendre en compte sa variation radiale. Ces derniers ont été broyés dans le 8000 D/Mixer Mill (broyeur électronique) pendant 6 à 10 minutes en fonction de l'échantillon de l'espèce considéré (en effet, plus la densité du bois d'une espèce est élevée, plus le temps de broyage est élevé). Des pesées (0,05 à 0,8 mg) ont été ensuite faites dans des capsules de 3 mm à l'aide d'une balance très sensible (X5205 Dual max : 81mg/220mg, $d=0,001\text{mg}/0,1\text{mg}$) (Fig. 15). Les teneurs en carbone contenues dans ces échantillons de masse sèche ont été mesurées en utilisant un Costech ECS 4010 Elemental Analyzer couplé au Thermo-Finnigan DeltaPlus XP Continuous-Flow Isotope Ratio Mass Spectrometer (CF-IRMS). Les résultats obtenus ont été calibrés à la documentation de référence certifiée et relative aux normes internationales telles que l'usage du matériel Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) à une précision standard de 0.1‰.



C





Fig. 15. Différentes étapes entreprises avant la détermination des teneurs en carbone au laboratoire « Queen's Facility for Isotope Research ». A=sous échantillons de bois ; B=broyage des sous échantillons dans le 8000 D/Mixer Mill ; C=poudre des sous échantillon broyés conservée dans des pots préalablement étiquetés. D=balance très sensible X5205 Dual max : 81mg/220mg, d=0,001mg/0,1mg utilisée pour des pesées.

II.3. ANALYSE DES DONNEES

Les données collectées sur le terrain ont été encodées dans une base de données Excel.

II.3.1. Détermination de la richesse spécifique et de la diversité floristique inventoriée

La flore inventoriée a été stratifiée en trois classes de diamètre (< 5 cm ; [5-10[et ≥ 10 cm). Pour chaque classe, la caractérisation de la flore a été faite sur la base des calculs des indices de diversité en utilisant le package « BiodiversityR » intégré au logiciel R (Kindt & Coe, 2005). Il s'est agi de calculer les indices de diversité tels que : (1) l'indice de diversité de Shannon (ISH) qui se définit comme suit : $ISH = -\sum \frac{Ni}{N} \times \log \frac{Ni}{N}$ avec : Ni=effectif de l'espèce i; N= effectif de toutes les espèces. Cet indice prend aussi en compte l'abondance relative des espèces. C'est l'indice le plus utilisé et le plus conseillé dans l'étude comparative des peuplements, car il est peu sensible à la taille de la population étudiée. Il accorde plus d'importance aux espèces rares. (2) l'Equitabilité de Piélou, EQ comprise entre 0 et 1 est égal à : $EQ = \frac{ISH}{\log(N)}$, correspond au rapport entre la diversité observée et la diversité maximale possible du nombre d'espèces (N) ; sa valeur pourrait être un signe de perturbation dans le milieu. Pour Dajoz (1982) une Equitabilité faible représente une grande importance de quelques espèces dominantes. (3) l'indice de Simpson permet d'évaluer la dominance. Il

exprime la probabilité pour que deux individus choisis au hasard dans une population infinie, appartiennent à la même espèce. Il s'exprime à partir des fréquences des espèces :

$$S = \frac{ni (ni-1)}{N (N-1)}$$

II.3.2. Caractérisation de la structure de la végétation

Les paramètres structuraux de la forêt tels que le dhp moyen et dominant, hauteur moyenne et dominante, nombre de tiges/ha, surface terrière moyenne et dominante ont été calculés dans le cadre de cette étude. Les paramètres dominants considérés sont les individus ayant un dhp > 60 cm (Djomo, 2015b) et les paramètres moyens correspondent à ceux dont les arbres ont un diamètre ≥ 1 cm. Ces paramètres ont été utilisés pour la caractérisation structurale de la forêt de l'UFA 10 065 sur la base des données d'inventaires collectées. La distribution des classes de diamètre de tous les arbres inventoriés d'amplitude 10 cm a été effectuée exceptés pour la classe de diamètre < 5 cm. La surface terrière (SA) a été calculée à partir de la formule : $SA = \frac{\pi \times D^2}{4}$. Ces valeurs ont été extrapolées à l'hectare en utilisant le facteur d'expansion $(FE) = \frac{10000}{Se}$ avec Se = surface échantillonnée en m^2 (Brown & Pearson, 2005)

II.3.3. Calcul de la densité du bois et de la biomasse sèche totale des arbres

Pour les échantillons collectés à la base de l'arbre, au niveau du tronc et au niveau des branche, la densité du bois a été calculée par la formule suivante : $\rho_{\text{échantillon}} = \text{masse sèche} / \text{masse volumique fraîche}$ (Fearnside, 1997 ; Noguiera et al., 2005 ; Henry et al., 2010). La densité moyenne de l'arbre est donc :

$$\rho_{\text{de l'arbre}} = \frac{\rho_{\text{base}} + \rho_{\text{tronc}} + \rho_{\text{branche}}}{3}$$

Quand cela était possible la densité du bois des racines a été aussi considérée dans cette formule. La moyenne de densité du bois de ces échantillons est donc celle qui a été utilisée comme l'une des variables prédictives pour l'établissement des équations allométriques.

Pour les arbres entièrement pesés sur le terrain, la masse sèche totale (des racines, du tronc et des branches) a été obtenue en soustrayant de la masse fraîche des différents compartiments le poids de l'eau évaporée. La formule de Brown & Pearson (2005) suivante a donc été utilisée pour le calcul de la masse sèche totale d'un compartiment de l'arbre :

$$\text{masse sèche totale} = \frac{\text{masse fraîche totale} \times \text{masse sèche échantillon}}{\text{masse fraîche échantillon}}$$

Pour la souche des arbres, le tronc et les grosses branches, en les considérant comme cylindrique, les données de diamètre obtenues sur chaque tronçon de 2 m, ont été utilisées pour calculer leur volume (V_s) suivant la relation préconisée par Henry et *al.* (2010) définie ci-contre:

$$V_s = \frac{\pi \times L_s}{8} \times (D_1^2 + D_2^2)$$

Avec V_s = le volume en m^3 ; L_s = hauteur totale de la section (soit 2 m) ; D_1 et D_2 représentent les diamètres aux deux extrémités respectivement de la section ou du tronçon considéré (m).

Pour les grands arbres qui possédaient les contreforts, le calcul du volume de chaque contrefort a été fait en utilisant la formule suivante :

$$V_q = \frac{4 \times (L_b \times H_b) - (\pi \times H_b \times L_b)}{4} \times \frac{W_b}{3}$$

Avec V_q le volume du contrefort (m^3), L_b sa longueur (m), W_b sa largeur (m) et H_b sa hauteur (m).

La masse totale (AGB) est ensuite calculée grâce à la relation qui lie la densité du bois au volume de la section considérée (Henry et *al.*, 2010).

$$AGB = \sum_{b=1}^l (V_b \times \rho_b) + \sum_{t=1}^m (V_t \times \rho_t) + \sum_{s=1}^n (V_s \times \rho_s) + \sum_{t=1}^q M_{brt}$$

II.3.4. Etablissement des équations allométriques

La biomasse des arbres s'estime sur la base des modèles mathématiques. Le lien entre les variables de l'arbre et leur masse a été testé à l'aide des logiciels R version 3.3.2 (R Core Team, 2016) et STATISTICA. Pour la construction des équations allométriques les modèles logarithmiques ont été utilisés (même si les modèles linéaires ont été aussi testés) dans la plupart des cas puisqu'ils sont recommandés pour leur fiabilité (Xiao et *al.*, 2011 ; Djomo et *al.*, 2016). Les variables à expliquer prises en compte étaient la masse sèche de l'arbre (masse totale, masse racinaire, masse épicé, masse des branches, masse du tronc et masse de la

couronne), la hauteur de l'arbre, le diamètre du houppier et les variables explicatives étaient le diamètre de l'arbre, la hauteur (totale, du tronc et de la couronne), diamètre de la couronne et la densité du bois.

Plus de 50 modèles ont été testés et ceux sélectionnés avaient un coefficient de détermination ($Adj.R^2$) ≥ 80 %. Ces modèles testés étaient essentiellement ceux représentés ci-dessous et qui sont en fait les plus communément utilisés dans l'établissement des allométries (Brown et *al.*, 1989 ; Chave et *al.*, 2005, 2014 ; Djomo et *al.*, 2010, 2016 ; Djomo, 2015a ; Ploton et *al.*, 2016). Les modèles choisis étaient :

$$(1) Y = a + b \times D$$

$$(2) Y = a + b \times D + c \times D^2$$

$$(3) \ln Y = a + b \times \ln D$$

$$(4) \ln Y = a + b \times \ln(D \times H)$$

$$(5) \ln Y = a + b \times \ln(D \times \rho)$$

$$(6) \ln Y = a + b \times \ln(D \times C)$$

$$(7) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times H)$$

$$(8) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times \rho)$$

$$(9) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times H \times \rho)$$

$$(10) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times H \times \rho \times C)$$

$$(11) \ln Y = a + b \times \ln D + c \times (\ln(D))^2$$

$$(12) \ln Y = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(\rho)$$

$$(13) \ln Y = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(H)$$

$$(14) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times H) + c \times \ln(\rho)$$

$$(15) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times H \times \rho) + c \times \ln(C)$$

$$(16) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times H \times C) + c \times \ln(\rho)$$

$$(17) \ln Y = a + b \times \ln D + c \times \ln H + d \times \ln(\rho)$$

$$(18) \ln Y = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(D^2 \times H) + d \times \ln(\rho)$$

$$(19) \ln Y = a + b \times \ln(D^2 \times H) + c \times \ln(\rho) + d \times \ln(C)$$

$$(20) \ln Y = a + b \times \ln D + c \times \ln D^2 + d \times \ln D^3 + e \times \ln(\rho)$$

$$(21) \ln Y = a + b \times \ln D + c \times \ln H + d \times \ln(\rho) + e \times \ln(C)$$

Y= biomasse en kg ; D= diamètre de l'arbre en cm ; H= hauteur de l'arbre en m; ρ = densité du bois ; C= diamètre de la couronne en cm ; a, b, c, d et e représentent les coefficients.

Pour l'estimation de la biomasse des branches, 3 modèles dépendant du diamètre basal de la branche et de la densité du bois ont été choisis. Ainsi, les modèles (3), (5) et (12) ont été présentés dans ce travail. Pour tester la biomasse épigée, dans un premier temps les modèles

utilisant le dhp comme prédicteur ont été utilisés ; deuxièmement, les modèles utilisant le dhp-hauteur, le dhp-densité du bois, le dhp-diamètre de la couronne comme prédicteurs, ensuite le dhp-hauteur-densité du bois, le dhp-hauteur-diamètre de la couronne et enfin le modèle utilisant le dhp-hauteur-densité du bois-diamètre de la couronne. La même procédure a été faite pour développer les allométries d'estimations de la biomasse hypogée, du tronc, de la couronne et de l'arbre entier (épigée + hypogée).

Plusieurs études (Djomo et *al.*, 2010, Ngomanda et *al.*, 2014, Djomo et *al.*, 2016) ont montré que l'introduction de la hauteur améliore la qualité de la prédiction de la biomasse épigée. Ainsi, la hauteur totale mesurée sur les arbres abattus a été utilisée pour développer des équations allométriques pour leur estimation. Pour cela, les modèles (1), (3), (5) et (12) ont été retenus dans cette étude pour les allométries d'estimation de la hauteur des arbres ; lesquels dépendent du dhp et de la densité du bois. Il en était de même pour les allométries d'estimation du diamètre de la couronne compte tenu de son implication dans les études de télédétection (Kurz et *al.*, 2016 ; Ploton et *al.*, 2016).

II.3.4.1. Critères de sélection des meilleurs modèles

Multiples combinaisons de variables, ainsi que des transformations des variables ont été aussi effectuées. Ces transformations de variables introduisent souvent des biais systématiquement qui se corrigent en utilisant le facteur de correction $CF = e^{\left(\frac{RSE^2}{2}\right)}$ (Bakusi et *al.*, 2009). Toutefois, dans le cadre de cette étude, la formule $CF = RSE^2/2$ a été utilisée (Djomo et *al.*, 2016).

La sélection des meilleurs modèles s'est faite sur la base des tests supplémentaires qui ont été effectués lesquelles sont en fait des indicateurs de la qualité de l'ajustement des équations testées (Chave et *al.*, 2005). Parmi ces tests, ceux considérés étaient « Critère d'Information de Akaike » (AIC), l'erreur standard résiduelle (RSE) et le coefficient de corrélation (Adj.R²) (Akaike, 1974 ; Alvarez et *al.*, 2012 ; Chave et *al.*, 2005 ; Djomo et *al.*, 2010). Le meilleur modèle est celui dont l'AIC, le RSE sont faibles et le Adj.R² élevé. Pour Chave et *al.* (2005), L'AIC et le RSE tous deux donnent des informations suffisantes pour le choix d'un meilleur modèle de prédiction de la biomasse. Le RRMSE (« Relative Root Mean

Square Error ») $RRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{pi} - M_i}{M_i}\right)^2}$ et

l'erreur moyenne (%) = $100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{pi} - M_i}{M_i} \right)$ ont été aussi calculés pour chaque modèle.

M_{pi} est la masse sèche de l'arbre prédite « i », M_i est la masse sèche observée de l'arbre « i » et n =nombre d'arbre.

De plus, la validation des modèles a été aussi faite en comparant la biomasse estimée par chaque modèle avec la biomasse mesurée sur le terrain.

II.3.4.2. Comparaison des équations existantes

Les données de biomasse obtenues par les pesées directes (méthode destructive) ont été utilisées pour calculer pour chacune des biomasses estimées à partir des équations prises en compte pour les études comparatives, l'erreur moyenne (%), le RRMSE, la biomasse épigée totale, la biomasse épigée moyenne et le pourcentage du total et/ou de la moyenne de la biomasse (ratio biomasse totale estimée (suivant chaque équation) / biomasse observée * 100) des meilleures équations reportées par ces auteurs (Chave et *al.*, 2005, 2014; Djomo et *al.*, 2010,2016; Fayolle et *al.*, 2013; Ngomanda et *al.*, 2014). Ces modèles incluent le diamètre de l'arbre, la hauteur totale et la densité du bois comme prédicteurs.

II.3.5. Evaluation de la variation de la densité du bois

Plusieurs tests ont été effectués pour évaluer la variation verticale de la densité du bois. La normalité des variables a été testée pour définir le type de test (paramétrique ou non) à appliquer. Ainsi, les explorations graphiques (distribution des fréquences et quantile-quantile) et le test de Normalité de Shapiro-Wilk, ont permis de montrer que les données suivent une loi normale. L'ANOVA et le test HSD de Tukey's ont été utilisés et ont permis de montrer les différences significatives et de faire les comparaisons 2 à 2 respectivement entre les valeurs de densités du bois suivant sa variation verticale.

II.3.6. Détermination du facteur d'expansion de biomasse et du ratio

La biomasse épigée et la biomasse hypogée obtenues pour les arbres de classe de diamètre 4 – 121 cm ont été utilisées pour calculer le FEB (Facteur d'expansion de Biomasse) et le R (Ratio) en utilisant les formules ci-dessous (Levy et *al.*, 2004 ; Sanquetta et *al.*, 2011). Pour le FEB, il a été calculé spécifiquement pour chaque arbre par la formule suivante:

$$FEB = \frac{M_{bo} + M_{cr}}{M_{bo}} = \frac{M_{ag}}{M_{bo}}$$

avec M_{bo} = biomasse du tronc (kg), M_{cr} = biomasse de la canopée (kg) composée des branches, des feuilles et des fruits; $M_{ag} = M_{cr} + M_{bo}$ (kg) est la

biomasse épigée. Avec la considération de toutes les espèces d'arbres échantillonnées la valeur moyenne du FEB a été obtenue par la formule :

$FEB = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N FEB_i$ avec N= nombre d'arbres échantillonnés, FEB_i= FEB de chaque individu.

Le ratio a été calculé en utilisant la formule suivante: $R = \frac{M_{be}}{M_{ag}}$ avec M_{be} =

biomasse hypogée (kg). La valeur moyenne a été déterminée par la formule : $R = \frac{1}{N} \times$

$\sum_{i=1}^N R_i$ avec N= nombre d'arbre échantillonné, R_i= R de chaque arbre.

Sur la base des données dendrométriques (diamètre, hauteur et diamètre de la couronne) collectées sur chaque arbre, des matrices de corrélation utilisant le coefficient de corrélation de Pearson ont été faites.

II.3.7. Estimation de la biomasse forestière

La biomasse des différents compartiments de l'arbre (racine, tronc et canopée) a été estimée à partir des équations allométriques spécifiques à la zone d'étude (Djomo & Chimi, 2017). Cette biomasse a été stratifiée suivant les classes de diamètre suivantes: $1 < dhp < 10$, $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$, $60 \leq dhp < 90$ et $dhp \geq 90$ cm. Les équations utilisées correspondaient aux meilleures équations spécifiques qui prennent en compte le diamètre, la densité du bois et/ou la hauteur de l'arbre (Djomo & Chimi, 2017). Ces équations ont permis d'estimer la biomasse du tronc, de la canopée et des racines. Il s'agit des équations suivantes :

$M = e^{(-2,931+0,896 \times \ln(D^2 \times H))}$ pour la biomasse du tronc;

$M = e^{(-2,988+2,474 \times \ln(D)+1,652 \times \ln(\rho))}$ pour la biomasse de la canopée;

$M = e^{(-2,217+1,042 \times \ln(D^2 \times \rho))}$ pour la biomasse des racines;

La biomasse biologique ou totale considérée dans cette étude correspondait à la somme de la biomasse hypogée (racine) + biomasse épigée (tronc + canopée).

Deux équations spécifiques ont été utilisées pour l'estimation de la biomasse totale épigée (Tableau III). Elles ont été établies à partir des données collectées sur 237 arbres de dhp compris entre 1 à 121 cm. La moyenne de la biomasse épigée obtenue à partir des deux équations de Djomo & Chimi (2017) a permis d'estimer la biomasse spécifique à la zone d'étude. Cette biomasse moyenne estimée à l'hectare a été comparée aux valeurs de biomasse

estimées à partir des équations existantes locales (Fayolle *et al.*, 2013, Ngonmanda *et al.*, 2014) et pantropicales utilisables dans la zone d'étude (Djomo *et al.*, 2010 ; Chave *et al.*, 2005 ; Chave *et al.*, 2014 ; Djomo *et al.*, 2016) (Tableau III). Les explorations graphiques et le test de Normalité de Shapiro-Wilk ont été utilisés pour vérifier la loi normale et les tests paramétriques d'ANOVA et de Turkey's ont permis de comparer les biomasses obtenues en fonction des équations utilisées.

Tableau III. Equations allométriques prises en compte pour la comparaison de l'estimation de la biomasse forestière. N = nombre d'arbre; M=biomasse épigée; D= diamètre de l'arbre (cm); H= hauteur (cm); ρ = densité du bois.

Equations allométriques	Types	N	Auteurs
$M = e^{(-2,448+2,578 \times \ln(D))}$	Cameroun	237	Djomo & Chimi (2017)
$M = e^{(-1,836+2,619 \times \ln(D)+1,268 \times \ln(\rho))}$	Cameroun	237	Djomo & Chimi (2017)
$M = e^{(-2,378+0,289 \times (\ln(D))^2 - 0,037 \times (\ln(D))^3 + 0,742 \times \ln(D^2 \times H) + 0,284 \times \ln(\rho))}$	pantropicale	274	Djomo <i>et al.</i> (2010)
$M = e^{(-2,359+1,325 \times \ln(D)+0,469 \times \ln(D^2 \times H)+0,802 \times \ln(\rho))}$	pantropicale	570	Djomo <i>et al.</i> , (2016)
$M = e^{(-1,656+2,541 \times \ln(D)+1,112 \times \ln(\rho))}$	pantropicale	844	Djomo <i>et al.</i> , (2016)
$M = \rho \times e^{(-1,183+1,940 \times \ln(D)-0,239 \times (\ln(D))^2 - 0,029 \times (\ln(D))^3)}$	Cameroun	133	Fayolle <i>et al.</i> (2013)
$M = e^{(-2,568+0,952 \times \ln(D^2 \times H)+1,189 \times \ln(\rho))}$	Gabon	101	Ngomanda <i>et al.</i> (2014)
$M = \rho \times e^{(-1,499+2,148 \times \ln(D)+0,207 \times (\ln(D))^2 - 0,028 \times (\ln(D))^3)}$	pantropicale	2410	Chave <i>et al.</i> (2005)
$M = 0,0673 \times (D^2 \times H \times \rho)^{0,976}$	pantropicale	4004	Chave <i>et al.</i> (2014)

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. RESULTATS

III.1.1. Caractérisation de la flore et de la structure de la forêt

III.1.1.1. Richesse spécifique et indices de diversité floristique

Les espèces inventoriées ont été classifiées en trois classes de diamètre à savoir : $dbh < 5$ cm, $5 \leq dbh < 10$ cm et $dbh \geq 10$ cm. Pour les espèces de $dbh < 5$ cm, 30 espèces ont été identifiées. Pour la classe $5 \leq dbh < 10$ cm, 24 espèces ont été identifiées et pour la classe de $dbh \geq 10$ cm, 127 espèces ont été identifiées. Un total de 139 espèces de $dbh \geq 1$ cm a été identifié dans la zone d'étude.

Pour les espèces identifiées jusqu'au niveau taxonomique du genre, elles appartenait à 68 genres et 28 familles. Les 8 familles les plus représentatives de la zone d'étude en termes de nombre d'espèces sont les Meliaceae, les Malvaceae, les Fabaceae, les Euphorbiaceae, les Annonaceae, les Apocynaceae, les Rubiaceae et les Sapotaceae. Celles-ci comptaient au minimum 5 espèces (Fig. 16).

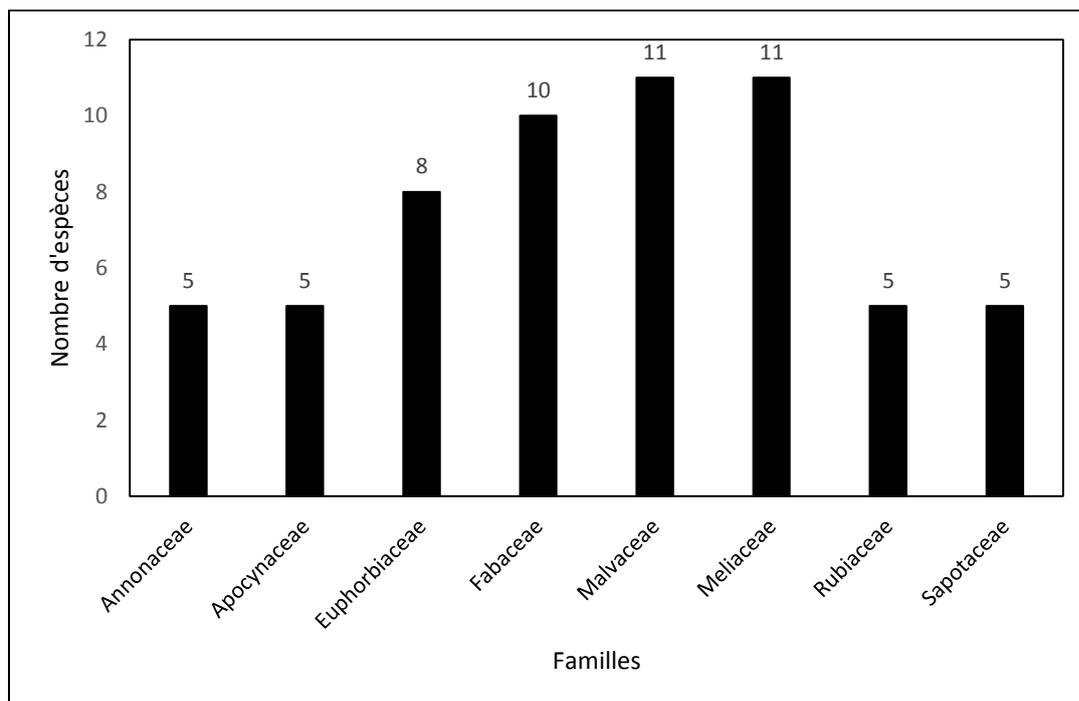


Fig. 16. Familles les plus représentatives de la zone d'étude en termes de nombre d'espèces.

Du point de vue classe de diamètre, les familles les plus abondantes de la classe de diamètre > 5 cm sont les Fabaceae, les Euphorbiaceae et les Meliaceae avec au moins 3 espèces chacune ; pour la classe $5 \leq dbh < 10$ cm, les familles les plus abondantes sont les Meliaceae et les Euphorbiaceae avec 4 espèces chacune, les Annonaceae, les Moraceae, les Malvaceae comptant chacune 3 espèces. Pour la classe de $dbh \geq 10$ cm, les familles les plus abondantes sont les Meliaceae (11 espèces), les Malvaceae (11 espèces) et les Euphorbiaceae

(8 espèces). Les Annonaceae, les Apocynaceae, les Rubiaceae et les Sapotaceae quant à elles avaient chacune 5 espèces.

Les indices de diversité ont été calculés en fonction des trois classes de diamètre considérées ci-dessus. Il ressort que la valeur de l'indice de Shannon qui varie de 2,47 pour les arbres de $dbh < 5$ cm à 3,88 pour les arbres de $dbh \geq 10$ cm témoigne d'une riche diversité floristique dans la zone d'étude. Pour les valeurs des indices de Simpson et Piéluou trouvées, celles-ci sont supérieures à 0,7 quelle que soit la classe de diamètre considérée. Elles montrent cependant que la flore qui semble équitablement répartie, est marquée par l'abondance de quelques espèces du point de nombre d'individus (Tableau IV).

Tableau IV. Richesse spécifique, indices de Shannon, Piéluou et Simpson en fonction des classes de diamètre.

Classes de diamètre (cm)	Richesse spécifique	Shannon	Piéluou	Simpson
< 5	30	2,47	0,726	0,854
[5-10[24	2,83	0,879	0,903
≥ 10	127	3,88	0,800	0,958

III.1.1.2. Structure de la forêt de la zone d'étude

III.1.1.2.1. Variation du nombre de tiges en fonction des classes de diamètre

Dans cette zone, 5742 tiges/ha de $dbh \geq 1$ ont été dénombrées. Cette densité du nombre de tiges à l'hectare diminue avec l'augmentation des classes de diamètre d'où l'allure de la courbe en « J » renversée obtenue (Fig. 17). Cette densité diminue de 4633 tiges/ha pour la classe de diamètre <5 cm à 8 tiges/ha pour la classe de diamètre > 90 cm.

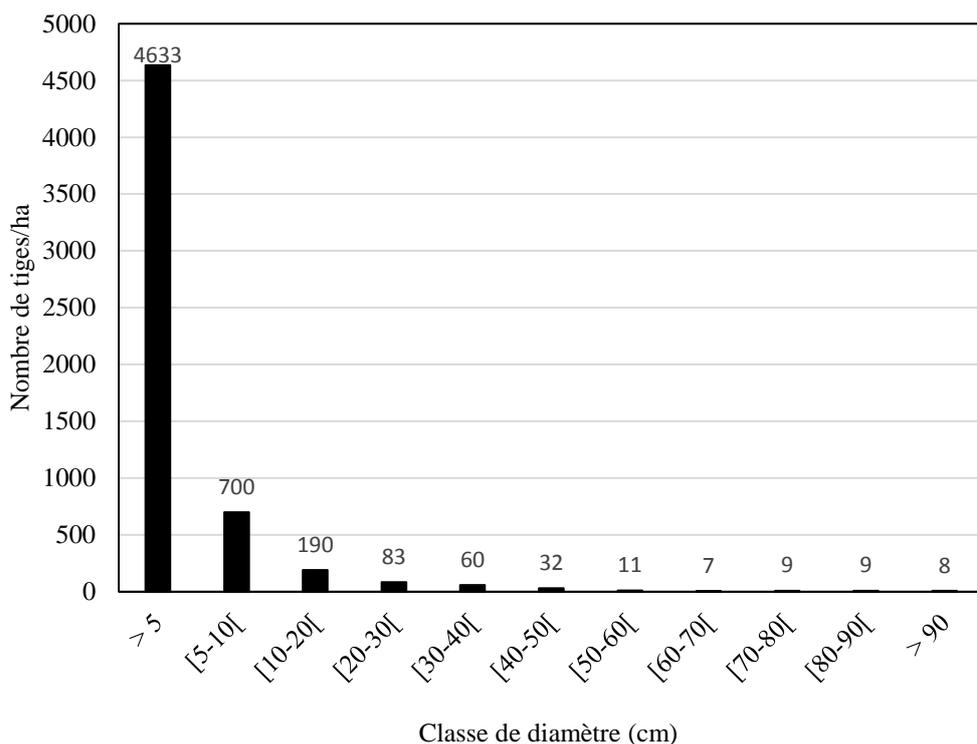


Fig. 17. Distribution du nombre de pieds par hectare en fonction des classes de diamètre

III.1.1.2.2. Abondance des tiges et surface terrière

Suivant les trois classes de diamètre considérées pour la diversité floristique, la classe de diamètre > 5 cm a présenté la plus grande abondance en termes du nombre de pieds d'arbre à l'hectare (4633 tiges/ha), soit 81 % de la proportion de tous les arbres à l'hectare et inversement une faible surface terrière (2,79 m²/ha), soit 6,71 % de la surface totale de la zone d'étude. Par contre, les arbres de $dbh \geq 10$ qui ont une faible abondance en termes de nombre de pieds à l'hectare (409 tiges/ha), soit 7,12 % occupent une surface terrière plus importante (36,75 m²/ha); soit 88,34 % de la surface totale (Tableau V). Toutefois, la surface terrière de l'ensemble de la flore ($dbh \geq 1$ cm) a donné une valeur moyenne de 41,60 m²/ha.

Considérant la classe de diamètre dominante ($dbh > 60$ cm) de la forêt, une moyenne de 33 tiges/ha (soit 0,6 % du nombre tiges totale) correspondant à une surface terrière moyenne de 16,95 m²/ha, soit 41 % de la surface terrière totale de la zone d'étude.

Tableau V. Caractérisation structurale de la forêt en fonction des classes de diamètre

Classes de diamètre (cm)	Nombre de tiges/ha	Surface terrière (m ² /ha)	Nombre de tiges (%)	Surface terrière (%)
< 5	4633	2,79	80,68	6,71
[5-10[700	2,06	12,19	4,95
≥ 10	409	36,75	7,12	88,34
Total	5742	41,60	100	100

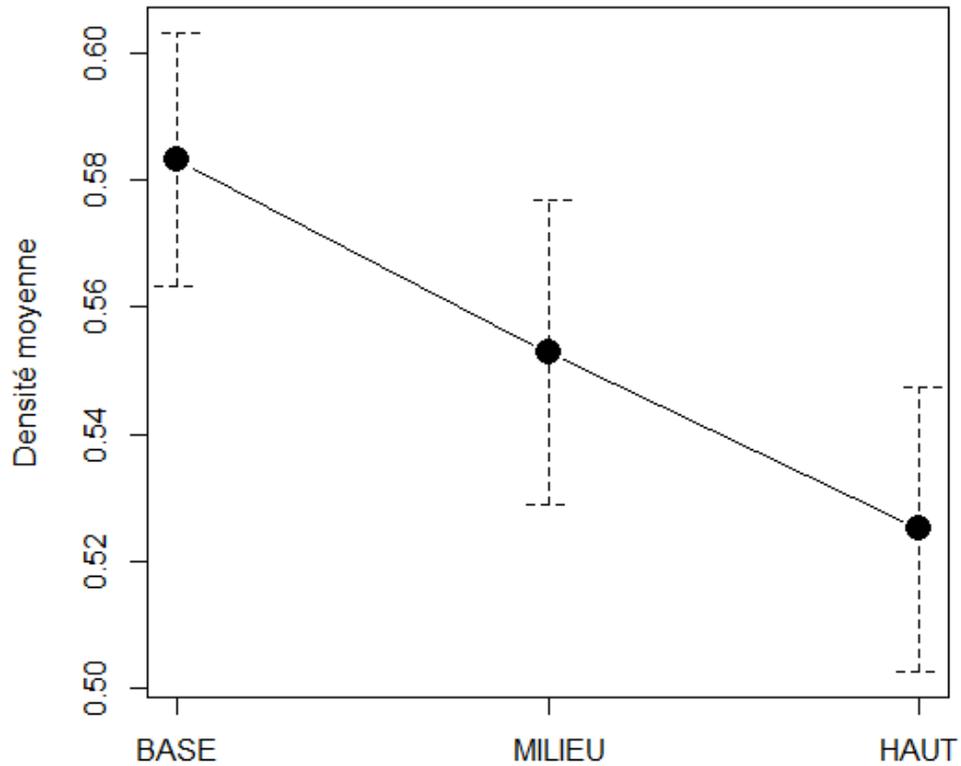
En plus des paramètres ci-dessus, les autres paramètres structuraux de la forêt correspondaient à un diamètre moyen de 25,17 cm, un diamètre dominant de 78,53 cm, à la hauteur moyenne de 17,43 m et la hauteur dominante de 32,48 m et la surface terrière dominante de 16,95 m²/ha. Les valeurs moyennes concernaient toute la flore inventoriée de dbh ≥ 1 cm et les valeurs dominantes moyennes concernaient tous les arbres de dbh > 60 cm.

III.1.2. Equations allométriques

III.1.2.1. Détermination de la densité du bois

En ce qui concerne les données de densité du bois de chaque arbre utilisé dans l'établissement des équations allométriques, compte tenu de sa variation verticale significative de la base aux branches de l'arbre (ANOVA, $p < 0,05$; Fig. 18), elles correspondaient à la moyenne de densité déterminée à trois niveaux sur chaque individu d'arbre (base de l'arbre, tronc et branches). Ainsi, au total 356 échantillons ont été collectés aux niveaux de la base, du milieu du tronc et des branches.

De façon spécifique, les densités du bois évaluées varient de 0,159 à 0,986 avec une moyenne de 0,561 dans la zone d'étude. Au niveau de la base, 184 échantillons ont été analysés et leurs densités varient de 0,227 à 0,986 avec une moyenne de 0,584. Au niveau du tronc, 83 échantillons ont été analysés et leurs densités varient de 0,273 à 0,912 avec une moyenne de 0,561. Au niveau des branches, 89 échantillons ont été analysés et leurs densités varient de 0,159 à 0,909 avec une moyenne de 0,514.



Stratification de l'arbre

Fig. 18. Variation verticale de la densité du bois en fonction des niveaux de mesure sur l'arbre

La moyenne de la densité du bois des trois niveaux de collecte pour chaque arbre est regroupée dans le tableau VI. Ce sont ces moyennes de densité du bois qui ont été utilisées dans l'établissement des équations allométriques. Ces densités varient de 0,295 pour *Annickia chlorantha* (Annonaceae) à 0,912 pour *Ficus* sp. (Moraceae). La densité moyenne de la zone d'étude est de 0,561.

Tableau VI. Valeur de la densité du bois des arbres échantillonnés pour l'établissement des équations allométriques. N= Nombre d'arbre ; ρ =densité du bois.

Famille	Noms scientifiques	N	Base	Milieu	Branche	Moyenne
Annonaceae	<i>Annickia chlorantha</i>	5	0,303	0,294	0,289	0,295
	<i>Greenwayoderdron suavealens</i>	3	0,670	0,601	0,547	0,606
	<i>Piptostigma</i> sp.	20	0,551	0,536	0,534	0,540
Apocynaceae	<i>Tarbernaemontanna crassa</i>	1	0,704	0,621	0,555	0,627
Clusiaceae	<i>Garcinia punctata</i>	3	0,676	0,605	0,578	0,620
Combretaceae	<i>Terminalia superba</i>	1	0,442	0,349	0,300	0,364
Euphorbiaceae	<i>Mallotus oppositifolius</i>	9	0,608	0,570	0,558	0,579
	<i>Microdesmis puberula</i>	24	0,613	0,578	0,523	0,571
	<i>Trilepisium madagascariensis</i>	3	0,519	0,413	0,451	0,461
Fabaceae	<i>Erytrophleum ivorensis</i>	7	0,750	0,736	0,590	0,692
	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	1	0,561	0,608	0,540	0,570
Lecythidaceae	<i>Petersianthus macrocarpus</i>	1	0,567	0,594	0,450	0,537
Meliaceae	<i>Entandophragma cylindricum</i>	1	0,704	0,674	0,605	0,661
	<i>Guarea</i> sp.	1	0,619	0,513	0,466	0,533
	<i>Guarea thompsonii</i>	1	0,560	0,529	0,490	0,526
	<i>Lovoa trichiloides</i>	2	0,534	0,498	0,469	0,500
	<i>Trichilia</i> cf. <i>monodelpha</i>	2	0,579	0,523	0,439	0,514
	<i>Trichilia rubescens</i>	19	0,517	0,476	0,468	0,487
Moraceae	<i>Scyphocyse manniana</i>	23	0,579	0,568	0,559	0,569
	<i>Ficus</i> sp.	1	0,917	0,912	0,908	0,912
Ochnaceae	<i>Rhabdophyllum arnoldianum</i>	1	0,710	0,636	0,625	0,657
Rhamnaceae	<i>Lasiodiscus mannii</i>	1	0,573	0,435	0,359	0,456
Malvaceae	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	11	0,412	0,409	0,385	0,402
	<i>Mansonia altissima</i>	1	0,596	0,506	0,496	0,533
	<i>Sterculia oblongum</i>	1	0,598	0,428	0,474	0,500
	<i>Carappa</i> sp.	1	0,624	0,613	0,602	0,613
	<i>Sterculia rhinopetala</i>	2	0,672	0,599	0,459	0,577
Tiliceae	<i>Ghyphae brevis</i>	1	0,620	0,476	0,394	0,497
Ulmaceae	<i>Celtis adolfi-friderici</i>	2	0,566	0,496	0,508	0,523
Violaceae	<i>Rinorea</i> sp.	3	0,521	0,511	0,471	0,501

III.1.2.2. Equations allométriques d'estimation de la biomasse des branches

Puisqu'il est difficile qu'après la chute de l'arbre, toutes les branches soient restées intactes, dans cette étude, les équations allométriques d'estimation de la masse sèche de ces

branches ont été établies à partir de 18 branches (y compris leurs feuilles) de diamètre basal compris entre 8 – 27 cm. Pour cela, trois modèles ont été considérés et ceux-ci prenaient en compte le diamètre basal et la densité du bois comme variables explicatives. Il ressort que le diamètre (D) est un bon prédicteur de la biomasse des branches (M) ; mais l’ajout de la densité du bois (ρ) dans le modèle améliore la qualité de la prédiction (Tableau VII). Ainsi, le meilleur modèle trouvé était : $M_{br} = e^{(-0,65+2,33 \times \ln(D \times \rho))}$ car c’est ce modèle qui avait les valeurs les plus faibles de RSE (0,604) et AIC (-15) et la valeur la plus élevée de l’Adj.R² (0,770). Ce modèle a été utilisé pour l’estimation de la biomasse des branches et feuilles non retrouvées ou endommagées de dhp > 8 cm.

Tableau VII. Equations allométriques pour l’estimation de la biomasse des branches et feuilles. M_{br} : biomasse des branches+feuilles ; D: Diamètre (dhp) ; ρ : densité du bois N : nombre de branches ; a,b et c : sont les paramètres (coefficients) du modèle ; RRMSE : « Relative Root mean square error » ; RSE : « Residual standart error » de l’estimation ; Adj.R² :coefficient de corrélation ; AIC : Akaike Information Criterion ; CF : Facteur de correction. (Note : Les analyses statistiques sont significatives à 95% d’intervalle de confiance. ***p <0.001;

Modèles	N	D	a	b	c	RRMSE	RSE	Adj.R ²	AIC	CF
$\ln M_{br} = a + b \times \ln(D)$	18	8 - 27	-3,766*	2,826***		0,612	0,808	0,588	-4	0,33
$\ln M_{br} = a + b \times \ln(D \times \rho)$	18	8 - 27	-0,830*	2,330***		0,732	0,604	0,770	-15	0,18
$\ln M_{br} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(\rho)$	18	8 - 27	-0,793*	2,320***	2,347***	0,595	0,622	0,756	-12	0,19

***p <0.01; *p <0.05 ; p >0.05. P-value de tous les modèles: <0.00001)

III.1.2.3. Equations allométriques d’estimation de la biomasse épigée

Les modèles de la prédiction de la biomasse épigée ont été développés en utilisant un ensemble de données de 237 arbres de dhp variant entre 1 et 121 cm. Ces résultats ont montré que lorsque les quatre variables indépendantes ou explicatives (diamètre, hauteur totale, densité du bois et diamètre de la couronne) sont prises en compte, la qualité de la prédiction de la biomasse par le modèle est meilleure par rapport à celle de tous les autres modèles testés. Ainsi, le modèle :

$M = e^{(-2,500+0,817 \times \ln(D^2 \times H)+0,817 \times \ln(\rho))+0,449 \times \ln(C)}$ était la meilleure équation allométrique pour la prédiction de la biomasse épigée de la zone d’étude si on s’en tient aux valeurs des tests supplémentaires effectuées (Tableau VIII). En effet, ce modèle avait les plus faibles valeurs de RRMSE (0,782), RSE (0,532), AIC (-291) et la valeur la plus élevée du Adj.R² soit 0,971.

Toutefois, le modèle prenant en compte le diamètre de l'arbre comme unique variable explicative a donné à lui seul un $\text{Adj.R}^2=0,955$, faisant de lui un bon prédicteur de la biomasse de l'arbre. La combinaison des variables 2 par 2 a montré que le dhp - hauteur de l'arbre avec pour $\text{Adj.R}^2 = 0,965$; $\text{RSE} = 0,578$; $\text{RRMSE} = 1,052$ et $\text{AIC} = -256$ était le meilleur modèle comparé aux autres combinaisons 2 à 2. Cependant, la combinaison des trois variables indépendantes (diamètre, hauteur, densité du bois) a fourni une meilleure prédiction pour l'estimation de la biomasse épigée par rapport à la prise en compte de seulement 2 variables prédictives dans le modèle.

La validation des modèles avec les données de biomasse observées (mesures directes) montre que pour une meilleure estimation de la biomasse épigée dans le site d'étude, la moyenne de la biomasse estimée par ces trois meilleurs modèles ci-dessous doit être utilisée. Il s'agit de :

$$\begin{aligned} M &= e^{(-2,481+2,101 \times \ln(D)+0,635 \times \ln(C))} ; \text{erreur moyenne de } - 3,7 \% \\ &= e^{(-2,688+2,578 \times \ln(D))} ; \text{erreur moyenne de } - 6,1 \% \\ &= e^{(-1,836+2,619 \times \ln(D)+1,268 \times \ln(\rho))} ; \text{erreur moyenne de } + 9,5 \% \end{aligned}$$

La moyenne de l'erreur moyenne de ces trois équations est de - 0,09 %.

D'un autre côté, le résultat de cette étude a montré l'importance de l'introduction du diamètre de la couronne dans les modèles. Il peut être utilisé comme un bon prédicteur pour la biomasse des arbres, vu son application potentielle dans les études de télédétection. Le fait de ne considérer que le diamètre de la couronne comme unique variable indépendante/explicative a fourni un modèle donc le coefficient de corrélation Adj.R^2 était de 0,873, avec $\text{RRMSE} = 3,036$; $\text{RSE} = 1,103$ et $\text{AIC} = 50$. L'ajout de la densité du bois dans le modèle n'a pas amélioré la qualité de la prédiction. Par contre, lorsque le diamètre de la couronne et la hauteur totale ont été pris en compte dans la prédiction, la qualité du modèle était meilleure et cela correspond au meilleur modèle sur la base des résultats des tests supplémentaires effectués. La combinaison du diamètre de la couronne, de la hauteur totale et de la densité du bois n'a pas amélioré la qualité de la prédiction (Tableau VIII).

La validation des modèles avec les données de biomasse observées montre que le meilleur modèle à utiliser pour mesurer la biomasse épigée dans l'application de la télédétection est le modèle ci-contre lequel avait une erreur moyenne de - 12 %. Ce modèle est le suivant :

$$M = e^{(-0,646+3,050 \times \ln(C))}$$

Tableau VIII. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse épigée de l'arbre. M :biomasse épigée ; D: Diamètre (dhp) ; H: Hauteur de l'arbre ; ρ: Densité du bois ; C: diamètre de la couronne ; N : Nombre d'arbre ; a,b,c,d,e : sont les paramètres (coefficients) du modèle ; RMSE : « Relative root mean square error » ; RSE : « Residual standart error » de l'estimation ; Adj.R²:coefficient de corrélation ; AIC : Akaike Information Criterion ; CF : Facteur de correction. (Note :Les analyses statistiques sont significatives à 95% d'intervalle de confiance. ***p <0.001; **p <0.01; *p <0.05 ; p >0.05. P-value de tous les modèles: <0.00001)

Modèles	N	D	a	b	c	d	RRMSE	RSE	Adj.R ²	AIC	CF
Diamètre (D)											
$\ln M = a + b \times \ln(D)$	237	1-121	-2,688***	2,578***			1,144	0,655	0,955	-197	0,21
$\ln M = a + b \times \ln(D^2 \times H)$	237	1-121	-3,146***	0,930***			1,052	0,578	0,965	-256	0,17
$\ln M = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(\rho)$	237	1-121	-2,026***	2,619***	1,268***		0,923	0,609	0,961	-229	0,19
$\ln M = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(C)$	237	1-121	-2,481***	2,101***	0,635***		0,899	0,617	0,960	-223	0,19
$\ln M = a + b \times \ln(D^2 \times H) + c \times \ln(\rho)$	237	1-121	-2,680***	0,939***	0,891***		0,912	0,553	0,968	-275	0,15
$\ln M = a + b \times \ln(D^2 \times H) + c \times \ln(\rho) + d \times \ln(C)$	237	1-121	-2,514***	0,817***	0,817***	0,449***	0,782	0,532	0,971	-291	0,14
Diamètre de la couronne (C)											
$\ln M = a + b \times \ln(C)$	237	1-121	-1,256***	3,050***			3,036	1,103	0,873	50	0,61
$\ln M = a + b \times \ln(C) + c \times \ln(H)$	237	1-121	-3,190***	1,145***	2,092***		1,023	0,704	0,948	-160	0,25
$\ln M = a + b \times \ln(C) + c \times \ln(\rho)$	237	1-121	-1,218***	3,052***	0,068 ^{ns}		3,034	1,105	0,873	53	0,61
$\ln M = a + b \times \ln C + c \times \ln H + d \times \ln(\rho)$	237	1-121	-3,193***	1,145***	2,092***	0,004 ^{ns}	1,017	0,706	0,948	-157	0,25

III.1.2.4. Equations allométriques d'estimation de la biomasse des différents compartiments de l'arbre

III.1.2.4.1. Biomasse du tronc et de la couronne

Quatre-vingt-seize (96) arbres de dhp variant de 4 à 121 cm ont été utilisés pour le développement des équations allométriques pour l'estimation de la biomasse du tronc et de la couronne. Le diamètre de l'arbre apparaît comme un bon prédicteur pour l'estimation de la biomasse du tronc et de la couronne (Tableau IX). Il a prédit mieux la biomasse de la couronne avec Adj.R² comprise entre 0,914 et 0,950 par rapport à la biomasse du tronc dont l'Adj.R² variait entre 0,879 et 0,883. D'un autre côté, la considération en plus du diamètre de l'arbre, de la variable hauteur totale était un bon prédicteur de la biomasse du tronc par rapport à la hauteur du tronc. Le meilleur modèle pour l'estimation de la biomasse du tronc a été obtenu lorsque le diamètre et la hauteur totale ont été pris en compte dans le modèle ; soit :

$M_{tr} = e^{(-2,931+0,896 \times \ln(D^2 \times H))}$. En plus de ces deux variables explicatives, la considération de la densité du bois comme troisième variable explicative dans le modèle n'a pas amélioré l'ajustement (Adj.R²=0,882). Cependant, pour la couronne, le meilleur modèle pour l'estimation de sa biomasse a été obtenu lorsque le diamètre, la hauteur de la couronne, le diamètre de la couronne et la densité du bois ont été pris en compte dans le modèle ; soit

$M_{cr} = e^{(-2,271+1,438 \times \ln(D)+0,325 \times \ln(Hc)+1,107 \times \ln(C)+0,832 \times \ln(\rho))}$
(Tableau IX).

La validation des modèles avec les données de biomasse observées montre que les meilleurs modèles pour l'estimation de la biomasse du tronc et de la couronne sont respectivement les modèles ci-dessous ; lesquels qui avaient pour erreur moyenne - 0,66 % et + 0,02 % respectivement pour le tronc et la couronne.

$M_{tr} = e^{(-2,064+2,169 \times \ln(D)+0,312 \times \ln(H_{tronc}))}$ M_{tr} = biomasse du tronc ;

$M_{cr} = e^{(-2,805+2,414 \times \ln(D))}$ M_{cr} = biomasse de la couronne.

Tableau IX. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse du tronc et de la couronne. M_{tr} et M_{cr} : biomasse du tronc et couronne respectivement ; D : diamètre de l'arbre échantillonné ; C : diamètre de la couronne, H : hauteur totale de l'arbre, Ht : hauteur du tronc, Hc : hauteur de la couronne ; ρ : densité du bois ; N : Nombre d'arbre; a, b, c, d et e sont les paramètres (coefficients) du modèle; RRMSE : « Relative root mean square error » ; RSE : « residual standard error » de l'estimation ; Adj R2 : coefficient de corrélation ; AIC : Akaike Information Criterion and CF : Facteur de correction. (Note : Les analyses statistiques sont significatives à 95% d'intervalle de confiance. ***p <0.001; **p <0.01; *p <0.05 ; p >0.05.

Modèles	N	D	a	b	c	d	e	RRSME	RSE	Adj.R ²	AIC	CF
Biomasse du tronc												
$\ln M_{tr} = a + b \times \ln(D)$	96	4-121	-2,553***	2,360***				4,423	0,985	0,879	1,10	0,49
$\ln M_{tr} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(\rho)$	96	4-121	-2,269***	2,380***	0,540 ^{ns}			3,963	0,985	0,879	3,10	0,49
$\ln M_{tr} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(Ht)$	96	4-121	-2,544***	2,129***	0,312 ^{ns}			4,796	0,977	0,882	1,53	0,48
$\ln M_{tr} = a + b \times \ln(D^2 \times H)$	96	4-121	-3,401***	0,896***				4,521	0,971	0,883	-1,65	0,47
$\ln M_{tr} = a + b \times \ln(D^2 \times H) + c \times \ln(\rho)$	96	4-121	-3,172***	0,901***	0,444 ^{ns}			4,195	0,972	0,882	0,55	0,47
$\ln M_{tr} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(Ht) + e \times \ln(\rho)$	96	4-121	-2,201***	2,132***	0,339 ^{ns}	0,650 ^{ns}		4,284	0,974	0,882	2,94	0,47
Biomasse de la couronne												
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln(D)$	96	4-121	-3,155***	2,414***				1,514	0,832	0,914	-31,31	0,35
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(\rho)$	96	4-121	-2,288***	2,474***	1,652			1,490	0,776	0,926	-42,69	0,30
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln(D^2 \times Hc)$	96	4-121	-3,340***	0,931***				1,137	0,735	0,933	-55,11	0,27
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(H)$	96	4-121	-3,145***	2,421***	-0,010 ^{ns}			1,520	0,836	0,914	-28,11	0,27
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(C)$	96	4-121	-2,744***	1,347***	1,450***			0,989	0,667	0,945	-71,75	0,22
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln D + c \times \ln H + d \times \ln(C)$	96	4-121	-2,643***	1,413***	-0,107 ^{ns}	1,452***		0,987	0,670	0,945	-68,89	0,22
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln D + c \times \ln Hc + d \times \ln(C)$	96	4-121	-2,902***	1,305***	0,404***	1,185***		0,960	0,652	0,948	-74,12	0,21
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln D + c \times \ln Hc + d \times \ln(C) + e \times \ln(\rho)$	96	4-121	-2,471***	1,438**	0,325 ^{ns}	1,107***	0,832**	0,964	0,638	0,950	-76,29	0,20
$\ln M_{cr} = a + b \times \ln D + c \times \ln H + d \times \ln(C) + e \times \ln(\rho)$	96	4-121	-2,080***	1,619***	-0,198 ^{ns}	1,301***	0,987**	1,004	0,649	0,948	-73,01	0,21

III.1.2.4.2. Biomasse des racines et biomasse totale

Pour l'ensemble des données contenant 25 arbres de diamètre variant de 4 à 33 cm, le dhp et la densité du bois ont été utilisés comme variables prédictives de la biomasse racinaire. Comme dans le cas de la biomasse épigée, le dhp à lui seul apparaît comme un bon prédicteur pour la biomasse racinaire ($Adj.R^2=0,89$). L'ajout de densité du bois a également amélioré la qualité du modèle (Fig. 19). Le meilleur ajustement a été obtenu avec l'équation suivante :

$M_{ra} = e^{(-2,217+1,042 \times \ln(D^2 \times \rho))}$. Cette équation avait pour $RRMSE = 0,219363$, $RSE = 0,323$, $Adj.R^2 = 0,933$ et $AIC = -53$. Toutefois, la validation du modèle avec les données de biomasse observées montre que le meilleur modèle pour l'estimation de la biomasse hypogée est :

$M_{ra} = e^{(-2,803+2,039 \times \ln(D))}$ avec une erreur moyenne de +0,17 %.

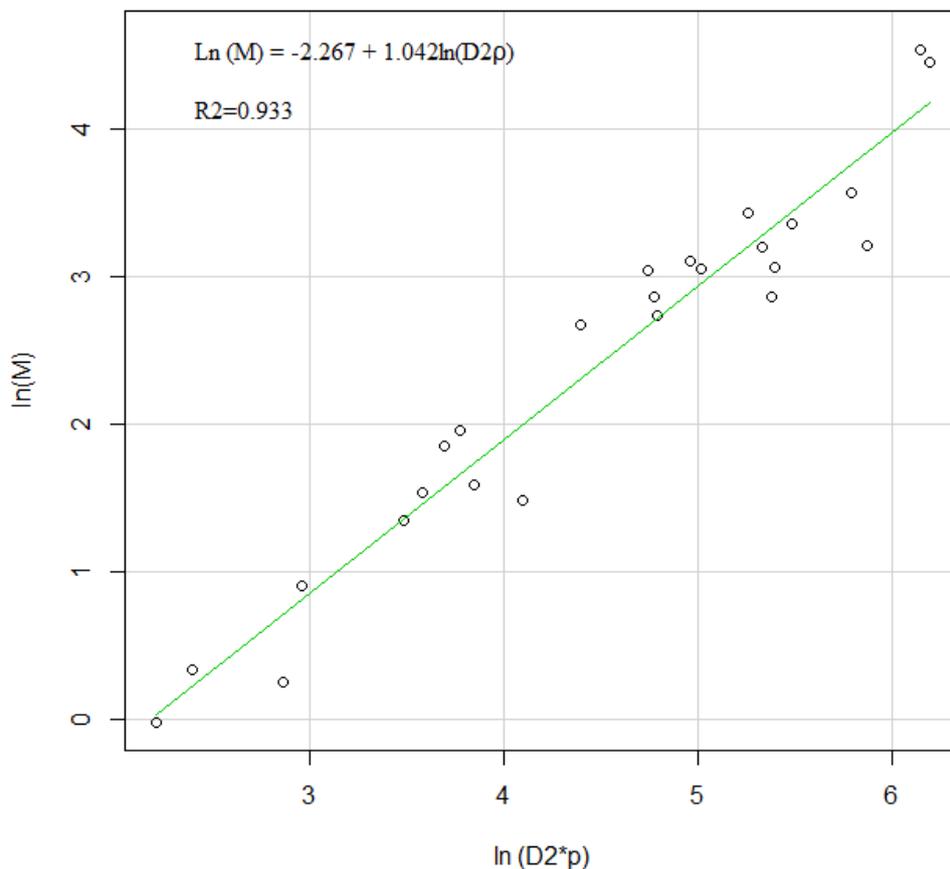


Fig. 19. Relation entre la biomasse souterraine, le dhp et la densité du bois.

Pour l'ensemble des données de 13 arbres dont le dhp, la hauteur totale, le diamètre de la couronne et la densité du bois ont été utilisés comme variables prédictives pour l'estimation de la biomasse totale. Le meilleur ajustement pour l'estimation de la biomasse totale a été

obtenu lorsque le diamètre et la densité du bois ont été pris en compte comme des prédictors. L'introduction de la hauteur et du diamètre de la couronne dans le modèle n'ont pas amélioré la qualité de l'ajustement (Tableau X).

Le modèle de la forme $\ln(Y)=b \times \ln(X)$ bien que donnant des valeurs élevées du Adj.R^2 , a donné des valeurs de AIC et RSE élevées. Avec donc un $\text{Adj.R}^2=0.948$, le modèle $\ln(\text{masse_racinaire}) = 0,6347 \times \ln(\text{masse_épigée})$ a permis de confirmer l'existence d'une relation entre la partie épigée et racinaire de l'arbre (Tableau X).

La validation du modèle avec les données de biomasse observées montre que l'inclusion du diamètre et de la densité du bois améliorent la qualité des modèles d'estimation de la biomasse totale. Ainsi les modèles retenus sont les suivants :

$$M_{to} = e^{(-1,679+2,298 \times \ln(D)-0,289 \times \ln(C))} \text{ avec une erreur moyenne de } +0,49 \% ;$$

$$M_{to} = e^{(-0,753+2,091 \times \ln(D)+0,828 \times \ln(\rho))} \text{ avec une erreur moyenne de } +0,62 \% .$$

Tableau X. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse racinaire et biomasse totale. M_{ra} et M_{to} : biomasse racinaire et totale respectivement D: diamètre des arbres échantillonnés (dhp) ; H: hauteur totale; ρ : densité du bois ; C : diamètre de la couronne. N = nombre d'arbres; a, b, c et d sont les paramètres (coefficients) du modèle ; RRMSE = « Relative root mean square error » ; RSE : « Residual standard error » de l'estimation ; Adj R^2 = coefficient de corrélation; AIC = Akaike Information Criterion et CF = Facteur de correction. (Note : Les analyses statistiques sont significatives à 95% d'intervalle de confiance. ***p <0.001; **p <0.01; *p <0.05 ; p >0.05. P-value de tous les modèles: <0.00001)

Modèles	N	D	a	b	c	d	e	RRMSE	RSE	Adj.R ²	AIC	CF
Biomasse racinaire												
$\ln M_{ra} = a + b \times \ln(D)$	25	4 -33	-2,883 **	2,039 ***				0,340	0,410	0,891	-41	0,08
$\ln M_{ra} = a + b \times \ln(D^2 \times \rho)$	25	4 -33	-2,267 ***	1,042 ***				0,219	0,323	0,933	-53	0,05
Biomasse totale												
$\ln M_{to} = a + b \times \ln(D)$	13	5-30	-1,475 **	2,153 ***				0,357	0,336	0,929	-24	0,06
$\ln M_{to} = a + b \times \ln(D^2 \times H)$	13	5-30	-1,942 ***	0,768 ***				0,331	0,320	0,935	-26	0,05
$\ln M_{to} = a + b \times \ln(D^2 \times H \times \rho)$	13	5-30	-1,219 ^{ns}	0,569 ***				0,693	0,427	0,884	-16	0,04
$\ln M_{to} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(\rho)$	13	5-30	-0,753 ^{ns}	2,091 ^{ns}	0,828 ***			0,306	0,289	0,947	-26	0,04
$\ln M_{to} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(C)$	13	5-30	-1,679 **	2,398 ***	-0,289 ^{ns}			0,358	0,336	0,928	-22	0,06
$\ln M_{to} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(H) + d \times \ln(C)$	13	5-30	-2,084 **	1,895 **	0,639 ^{ns}	-0,299 ^{ns}		0,315	0,335	0,929	-20	0,06
$\ln M_{to} = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(H) + d \times \ln(C) + e \times \ln(\rho)$	13	5-30	-0,899 ^{ns}	1,618 *	0,466 ^{ns}	0,113 ^{ns}	0,901 ^{ns}	0,320	0,307	0,940	-21	0,05
$\ln(M_{racinaire}) = b \times \ln(M_{épigée})$	13	5-30	-	0,638 ***				0,746	0,612	0,946	-12	0,19

III.1.2.5. Estimation de la hauteur totale et du diamètre de la couronne

Pour les estimations de la hauteur totale et du diamètre de la couronne, les équations allométriques ont été développées à partir des données de 237 arbres pour la hauteur totale et 235 arbres pour le diamètre de la couronne. Le dhp de ces arbres était compris entre 1-121 cm. Il ressort des modèles testés que le dbh est bon estimateur du diamètre de la couronne et de la hauteur totale de l'arbre (Fig. 20). Le modèle de régression linéaire multiple sans transformation logarithmique H ou $C = a + b \times D + c \times D^2$ fournit une bonne estimation de la hauteur totale et du diamètre de la couronne avec pour $\text{Adj.R}^2 > 0,9$. Cependant, la transformation logarithmique a amélioré la qualité de l'ajustement dans les deux cas (Tableau XI). Dans le cas de la hauteur totale, la meilleure équation allométrique a été obtenue lorsqu'en plus du diamètre de l'arbre, la densité du bois a été ajoutée au modèle. Pour l'estimation du diamètre de la couronne, la meilleure équation est celle qui dépend uniquement du diamètre car l'ajout de la densité du bois n'a pas amélioré la qualité de l'ajustement du modèle.

La validation des modèles d'estimation de la hauteur et du diamètre de la couronne de l'arbre avec les données de mesure directes sur le terrain montre que :

- pour la hauteur totale, les modèles retenues sont : H (hauteur totale) = $+3,795 + 0,418 \times D$, avec erreur de $+0,04 \%$ et

$$H = e^{(+0,657+0,789 \times \ln(D)+0,400 \times \ln(\rho))} \text{ avec une erreur moyenne de } +0,49 \%$$

- pour le diamètre de la couronne, les modèles retenus sont : DC (diamètre couronne) = $+ 1,195 + 0,227 \times D$, avec une erreur moyenne de $-0,09 \%$ et

$$C = e^{(-0,119+0,760 \times \ln(D)+0,280 \times \ln(\rho))} \text{ avec une erreur moyenne de } +1,27 \%$$

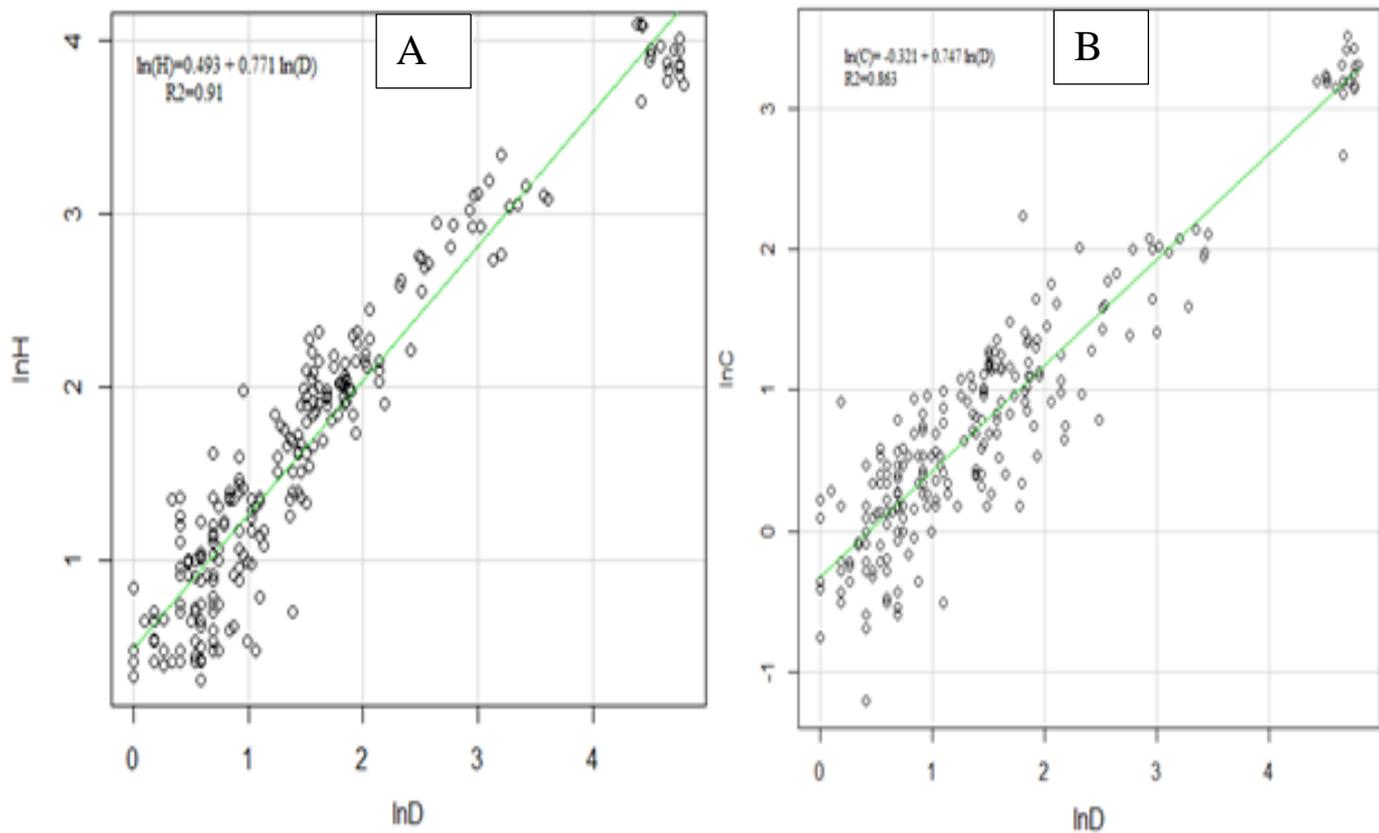


Fig. 20. Corrélation entre la hauteur totale et le diamètre de l'arbre et entre le diamètre de la couronne et le diamètre de l'arbre: A=hauteur-dhp ; B=diamètre de la couronne-dhp ; D= dhp, H= hauteur, C : diamètre de la couronne, N=Nombre d'arbres échantillonnés, Adj.R² : coefficient de corrélation

Tableau XI. Equations allométriques pour l'estimation de la hauteur totale et du diamètre de la couronne. H : hauteur totale ; C : diamètre de la couronne ; D : dhp de l'arbre ; ρ : densité du bois ; N : nombre de branche ; a.b.c : sont les paramètres (coefficients) du modèle; RMSE : « Relative root mean square error » RSE : « Residual standart error » de l'estimation ; Adj.R² : coefficient de corrélation ; AIC : Akaike Information Criterion; CF : facteur de correction. (Note : Les analyses statistiques sont significatives à 95% d'intervalle de confiance. ***p <0.001; **p <0.01; *p <0.05 ; p >0.05. P-value de tous les modèles: <0.00001)

Modèles	N	D	a	b	c	RRMSE	RSE	Adj.R ²	AIC	CF
Hauteur totale										
$H = a + b \times D$	237	1-121	3,795***	0,418***	-	0,823	3,841	0,900	642	7,38
$H = a + b \times D + c \times D^2$	237	1-121	0,936***	1,067***	-0,006***	0,352	2,140	0,969	367	2,29
$\ln(H) = a + b \times \ln(D)$	237	1-121	0,488***	0,776***	-	0,319	0,286	0,910	-589	0,04
$\ln(H) = a + b \times \ln(D) + c \times \ln(\rho)$	237	1-121	0,697***	0,789***	0,400***	0,305	0,277	0,916	-602	0,04
Diamètre de la couronne										
$C = a + b \times D$	235	1-121	1,195***	0,227***		0,657	1,506	0,945	196	1,13
$C = a + b \times D + c \times D^2$	235	1-121	0,826***	0,312***	-0,001***	0,530	1,450	0,949	179	1,04
$\ln(C) = a + b \times \ln(D)$	235	1-121	-0,326***	0,751***		0,414	0,353	0,863	-485	0,06
$\ln(C) = a + b \times \ln(D) + \ln(\rho)$	235	1-121	-0,179*	0,760***	0,280*	0,413	0,350	0,865	-487	0,06

III.1.2.6. Comparaison des équations existantes pour l'estimation de la biomasse dans la zone d'étude

Les valeurs de RRMSE, l'erreur moyenne, la biomasse totale (kg), la biomasse moyenne (kg) et le pourcentage du total et/ou de la moyenne de la biomasse épigée (ratio biomasse totale ou moyenne estimée (suivant chaque équation) / biomasse totale ou moyenne observée * 100) ont été calculés pour tester la fiabilité des équations allométriques existantes pouvant être applicables à ce site d'étude. Il ressort de ces comparaisons que l'équation de Djomo et *al.* (2016) a donné la valeur de biomasse totale, la plus proche de celle directement mesurée sur le terrain. Le ratio de cette équation étant de 1,83 % (pourcentage du rapport de la différence entre la biomasse estimée par le modèle et la biomasse totale et/ou moyenne mesurée). Cependant, la valeur la plus élevée a été obtenue avec l'équation de Djomo et *al.* (2010). L'équation pantropicale développée par Djomo et *al.* (2016) semble donc être fiable pour l'estimation de la biomasse aux environs de la zone d'étude où les équations spécifiques ne sont pas disponibles. Toutefois, les plus faibles valeurs de RRMSE (0,945) et erreur moyenne (18 %) ont été observées avec l'équation de Ngomanda et *al.* (2014). De plus, c'est cette équation qui a eu les valeurs les plus faibles de biomasse totale et biomasse moyenne soit respectivement 169 468 et 715 kg (Tableau XII). L'équation de Chave et *al.* (2014) a fourni une meilleure estimation que l'équation de Chave et *al.* (2005) avec les valeurs faibles du RRMSE, de l'erreur moyenne et du ratio.

Tableau XII. Comparaison de la biomasse estimée à partir des équations existantes et applicable dans cette étude

Modèles	Type de forêt	RRMSE	Erreur moyenne (%)	Biomasse total (kg)	Biomasse moyenne (kg)	Différence du total ou moyenne (%)
Cette étude	humide	-	-	225612	952	-
Djomo et <i>al.</i> (2016)	humide	1,164	41	229747	969	1,83
Fayolle et <i>al.</i> (2013)	humide	1,185	40	236521	998	4,84
Chave et <i>al.</i> (2014)	pantropicale	1,599	80	240665	1015	6,67
Chave et <i>al.</i> (2005)	pantropicale	1,823	103	241047	1017	6,84
Ngomanda et <i>al.</i> (2014)	humide	0,925	18	169468	715	-24,89
Djomo et <i>al.</i> (2010)	pantropicale	1,591	55	274012	1156	21,45

III.1.3. Détermination du facteur d'expansion de biomasse et du ratio

III.1.3.1. Statistiques descriptives du facteur d'expansion de biomasse et ratio

Les statistiques descriptives obtenues pour le FEB, le ratio et les variables mesurées sur les arbres dans le cadre de cette étude sont présentées dans le tableau XIII. Pour les 96 arbres appartenant à 40 espèces et 16 familles échantillonnés, les valeurs comprises entre 3,9 - 121,1 cm (moyenne 27,8), 5,1 - 55,2 m (moyenne 17,9), 1,2 - 33,5 cm (moyenne 7,9) ont été obtenues respectivement pour les variables dendrométriques diamètre, hauteur totale et diamètre de la couronne. La biomasse épigée quant à elle variait de 2,1 kg à 20153,6 kg pour une moyenne de 2348,7 kg. La biomasse racinaire des 12 arbres échantillonnés variait de 1,4 kg à 35,7 kg avec une moyenne de 16,1 kg. La valeur moyenne du FEB obtenue pour les 96 arbres était de 2,18 (1,02 - 11,7). Le ratio moyen obtenu pour les 12 arbres échantillonnés variait de 0,10 à 0,42 avec une moyenne de 0,22.

Tableau XIII. Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées, du facteur d'expansion de biomasse et du ratio.

	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Diamètre de la couronne (cm)	Biomasse épigée (kg)	Biomasse racinaire (kg)	FEB	Ratio
Moyenne	27,8	17,9	7,9	2348,7	16,1	2,18	0,22
Minimum	3,9	5,1	1,2	2,1	1,4	1,02	0,10
Maximum	121,1	55,2	33,5	20153,6	35,7	11,7	0,42
Ecart-type	38,5	15,1	8,7	5133,2	20,6	1,76	0,10
Nombre d'arbres	96	96	96	96	12	96	12

III.1.3.2. Valeurs du facteur d'expansion de biomasse et du ratio spécifique à chaque espèce

Le tableau XIV donne les valeurs moyennes spécifiques du FEB et du ratio pour chacune des 40 espèces échantillonnées. La faible valeur spécifique de FEB (1,02) a été obtenue chez *Lasiodiscus mannii* (Rhamnaceae) et la valeur spécifique la plus élevée (6,45) chez *Gambeya* sp. (Sapotaceae). Le ratio quant à lui, obtenu à partir de 12 arbres appartenant à 8 espèces. La plus faible valeur spécifique (0,10) a été obtenue chez *Mansonia altissima* (Malvaceae) et la valeur spécifique la plus élevée (0,42) chez l'espèce *Rinorea* sp. (Violaceae) (Tableau XIV).

Tableau XIV. Valeurs spécifiques de facteur d'expansion de biomasse et du ratio dans la zone d'étude. () : écart type quand c'est possible

Espèces	Famille	N	Diamètre	FEB	R
<i>Alchornea laxiflora</i>	Euphorbiaceae	1	8,5	2,32	-
<i>Annona mucosa</i>	Annoceae	4	4,8-26,5	4,20(3,64)	-
<i>Carapa</i> sp.	Malvaceae	1	5,0	1,75	-
<i>Celtis adolfi-friderici</i>	Ulmaceae	1	20,5	1,20(0,11)	0,11
<i>Celtis tessmannii</i>	Ulmaceae	4	10,3-30,4	2,12(1,85)	-
<i>Dialium</i> sp.	Fabaceae	1	12,0	1,05	-
<i>Drypetes</i> sp.	Euphorbiaceae	1	14,0	1,45	-
<i>Entandophragma cylindricum</i>	Meliaceae	1	5,9	1,69	-
<i>Erythrophloeum ivorensis</i>	Fabaceae	4	83,8- 109,5	2,03(0,29)	-
<i>Ficus</i> sp.	Moraceae	1	10,1	1,66	0,29
<i>Gambeya</i> sp.	Sapotaceae	2	8,8-16,2	6,45(7,04)	0,18(0,05)
<i>Garcinia punctata</i>	Clusiaceae	3	5,0-6,8	1,90(0,25)	-
<i>Ghyphaea brevis</i>	Tiliaceae	1	6,9	1,15	-
<i>Greenwayoderdron suavealens</i>	Annonaceae	3	4,7-18,7	1,56(0,09)	-
<i>Guarea</i> sp.	Meliaceae	1	4,5	1,44	-
<i>Guarea thompsonii</i>	Meliaceae	1	15,8	1,27	-
<i>Lasiodiscus mannii</i>	Rhamnaceae	1	4,4	1,02	-
<i>Lovoa trichiloides</i>	Meliaceae	1	4,6	1,03	-
<i>Mallotus oppositifolius</i>	Euphorbiaceae	3	5,0-6,3	1,76(0,51)	-
<i>Mansonia altissima</i>	Malvaceae	1	19,3	1,11	0,10
<i>Microdesmis puberula</i>	Euphorbiaceae	2	5,7-6,3	1,35(0,34)	-
<i>Petersianthus macrocarpus</i>	Lecythidaceae	1	31,7	2,14	-
<i>Picalima nitida</i>	Apocynaceae	1	8,9	1,93	-
<i>Piptostigma</i> sp.	Annonaceae	2	3,9-5,6	1,52(0,01)	-
<i>Rhodophyllum arnoldianum</i>	Ochnaceae	1	6,0	1,47	-
<i>Rinorea</i> sp.	Violaceae	3	4,9-8,5	1,55(0,33)	0,33(0,07)
<i>Scyphocyse manniana</i>	Moraceae	12	4,2-7,6	2,32(0,74)	-
<i>Sterculia oblongum</i>	Malvaceae	1	20,1	1,27	-
<i>Sterculia rhinopetala</i>	Malvaceae	2	19,2-22,2	1,21(0,03)	0,14(0,01)
<i>Tabernaemontana crassa</i>	Apocynaceae	1	7,8	2,00	-
<i>Tarenna grandiflora</i>	Rubiaceae	1	12,3	1,54	-
<i>Terminalia ivorensis</i>	Combretaceae	1	7,5	1,19	-
<i>Trichilia monodelpha</i>	Meliaceae	2	4,8-6,1	1,75(0,41)	-
<i>Trichilia rubescens</i>	Meliaceae	5	4,5-6,4	2,23(0,35)	-
<i>Trilepisium madagascariensis</i>	Moraceae	3	5,2-10,5	1,87(1,29)	-
<i>Triplochiton scelroxylon</i>	Malvaceae	14	90,0 – 121,1	1,40(0,20)	-
inconnue 1	Sapotaceae	1	7	3,37	-
inconnue 2	-	1	12,3	1,62	-
inconnue 3	-	1	4,8	4,20	-
inconnue 4	Rubiaceae	1	6,3	1,12	0,23
inconnue 5	-	1	7	4,42	-

III.1.3.3. Relation entre les variables dendrométriques de l'arbre, le facteur d'expansion de biomasse et le ratio

Les nuages des points ci-dessous montrent qu'il existe une relation entre le FEB, ratio et les variables dendrométriques de l'arbre (diamètre, hauteur totale et diamètre de la couronne). Vu la tendance de la ligne linéaire de chacune des régressions, le FEB est approximativement constant ($R^2 \approx 0$) pour toute augmentation du diamètre, de la hauteur totale et du diamètre de la couronne des arbres. Cependant, 89 % des valeurs spécifiques du FEB trouvées sont inférieures à 3 et 69 % des valeurs du FEB sont comprises entre 1 et 2. D'un autre côté, la ligne linéaire du ratio par contre, diminue avec l'augmentation du diamètre, de la hauteur totale et du diamètre de la couronne de l'arbre (Fig. 21).

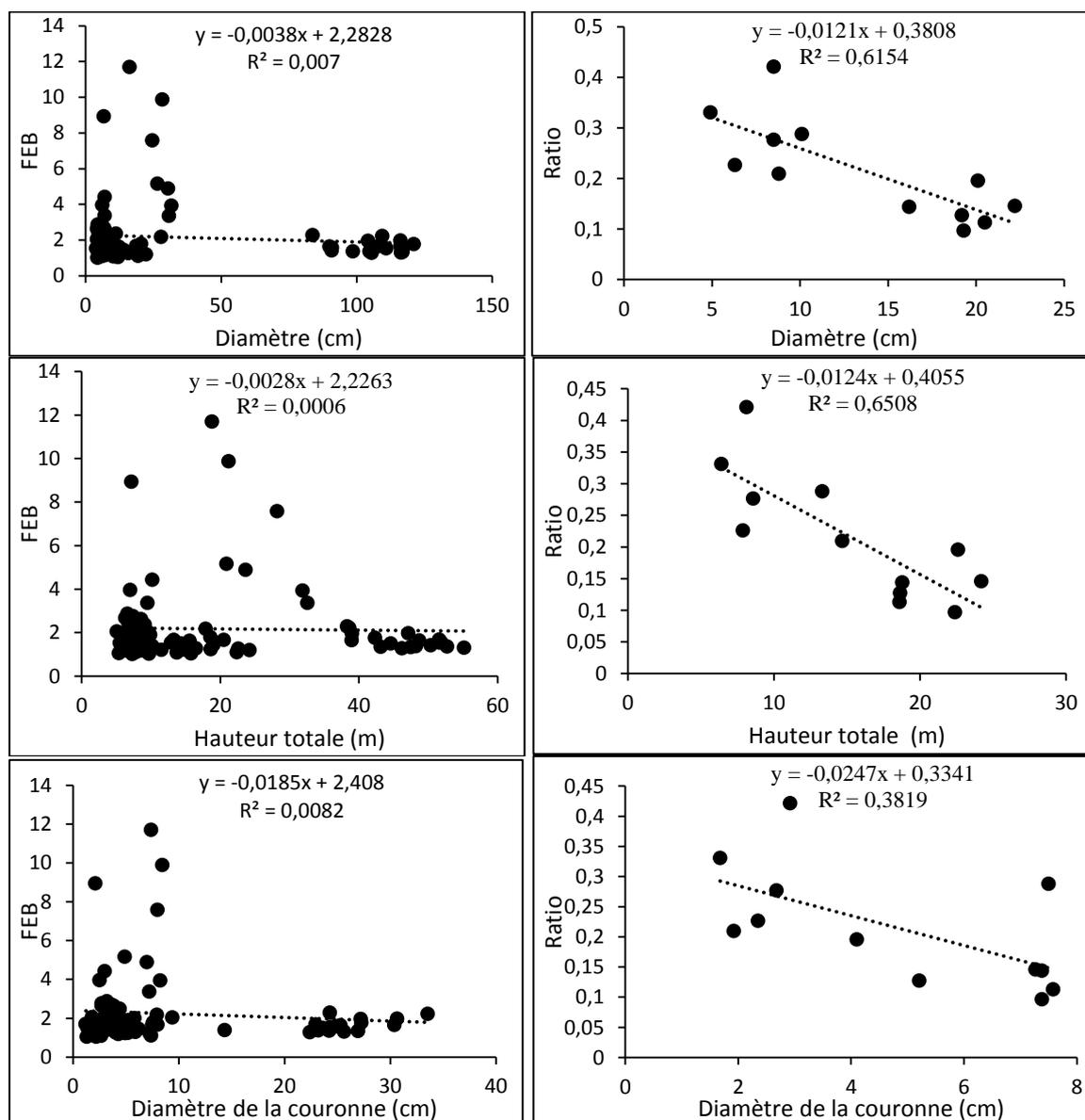


Fig. 21. Relation entre le facteur d'expansion de biomasse, le ratio et les variables dendrométriques (diamètre, hauteur totale et diamètre de la couronne).

III.1.3.4. Matrice de corrélation entre le facteur d'expansion de biomasse, ratio et les variables dendrométriques de l'arbre

La matrice de corrélation obtenue sur la base du coefficient de corrélation de Pearson entre le FEB et les variables dendrométriques a permis de confirmer les résultats de la figure 27. Ainsi, le coefficient de Pearson trouvé est sensiblement nul (-0.06 to -0.02) confirmant ainsi que le FEB reste sensiblement constant entre 1 et 2 pour toute augmentation des valeurs des variables dendrométriques excepté quelques cas observés.

Cependant, le coefficient de Pearson trouvé entre le ratio et les variables dendrométriques était négatif quelle que soit la variable considérée; confirmant aussi les résultats de la figure 27. Toutefois, la corrélation était plus importante entre le ratio et la hauteur totale (-0,777) par rapport au ratio et le diamètre (-0,768) et enfin entre le ratio et le diamètre de la couronne (-0,537) (Tableau XV).

Tableau XV. Matrice de corrélation entre les variables dendrométriques de l'arbre et le Ratio

	Diamètre de la couronne (cm)	Diamètre (cm)	Hauteur totale (m)	Ratio
Diamètre de la couronne (cm)	1	-	-	-
Diamètre (cm)	0,744	1	-	-
Hauteur totale (m)	0,716	0,947	1	-
Ratio	-0,537	-0,768	-0,777	1

III.1.4. Biomasse et teneur en carbone forestière dans la zone d'étude

III.1.4.1. Biomasse forestière

III.1.4.1.1. Biomasse épigée en fonction du diamètre de l'arbre

Pour toute augmentation du diamètre de l'arbre, la biomasse de ce dernier augmente (Fig. 22). Dans la zone d'étude, la biomasse estimée varie de 0,06 kg pour un arbre de diamètre de 1 cm à 31087,18 kg pour un arbre de dhp de 146 cm pour une moyenne de 751,54 kg par arbre.

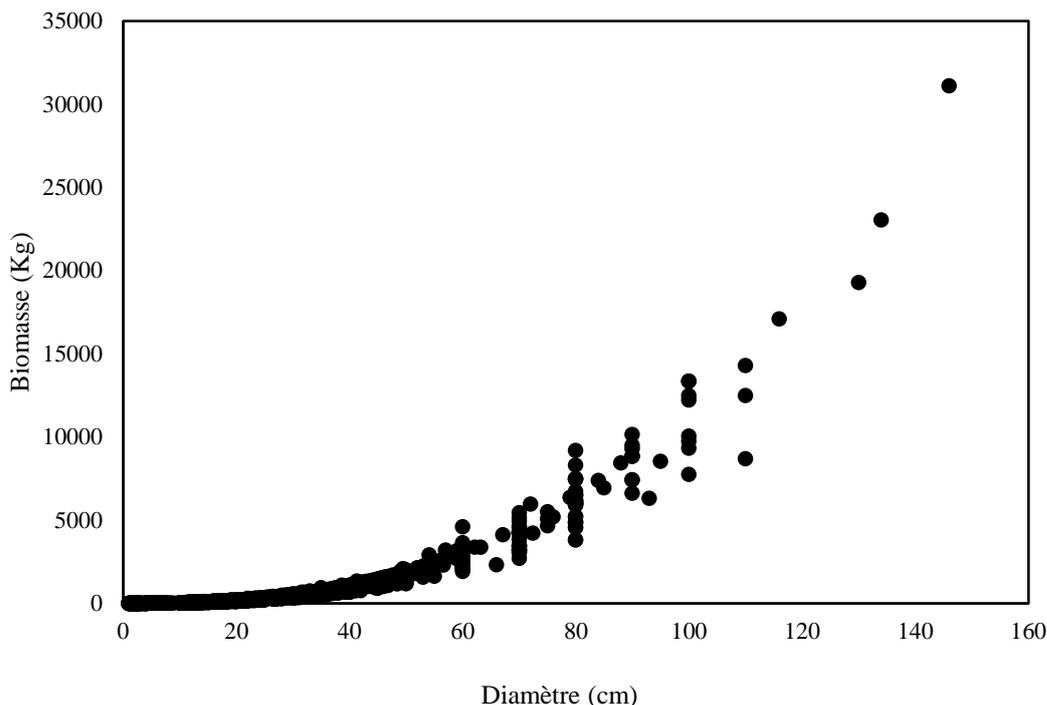


Fig. 22. Variation de la biomasse en fonction du diamètre de l'arbre

III.1.4.1.2. Biomasse épigée en fonction des classes de diamètre à l'hectare

La biomasse épigée a été stratifiée suivant 5 classes de diamètre : $1 \leq dhp < 10$ cm, $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$, $60 \leq dhp < 90$ et $dhp \geq 90$ cm. Il ressort que la proportion de biomasse la plus faible a été obtenue pour la classe de diamètre $1 \leq dhp < 10$ cm (11 t/ha soit 3 % de la biomasse épigée totale) et la classe qui renferme le plus de biomasse est la classe $60 \leq dhp < 90$ cm (112 t/ha, soit 31 %). Les classes, $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$ et $dhp \geq 90$ cm avaient respectivement les biomasses de 38 t/ha (11 %), 100 t/ha (28 %) et 97 t/ha (27 %) (Fig. 23). Toutefois, la classe de diamètre dominante de la forêt (> 60 cm) à elle seule contribue à environ 58 % (209 t/ha) à la biomasse épigée totale.

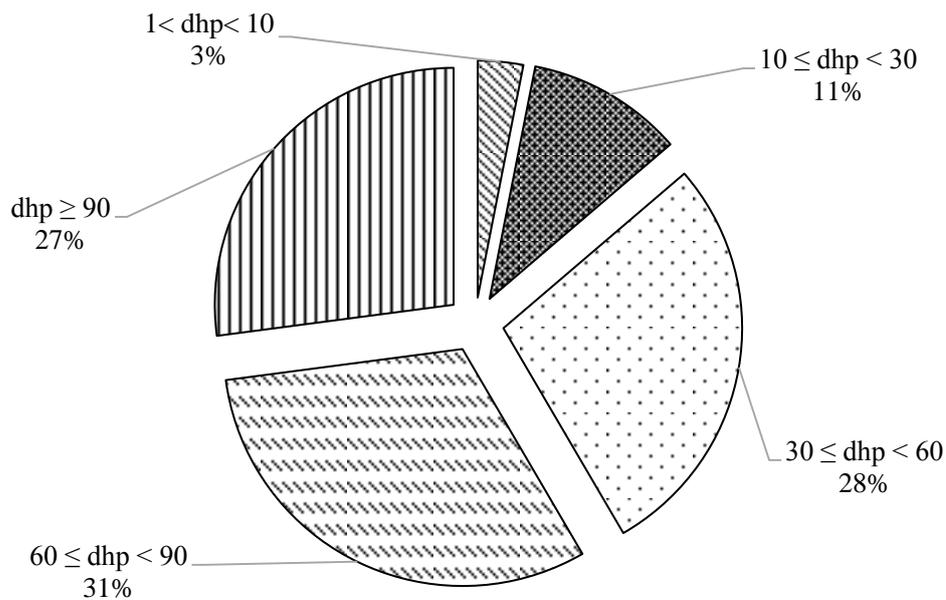


Fig. 23. Proportion de la biomasse épigée en fonction des classes de diamètre

III.1.4.1.3. Biomasse en fonction des compartiments de l'arbre

Avec une biomasse de 220 t/ha, le tronc est le compartiment de l'arbre ayant la proportion la plus élevée (52 %). Il est suivi directement par la canopée avec une biomasse de 146 t/ha ce qui correspond à une proportion de 35 %. Les racines représentent le compartiment qui contribue le moins à la biomasse forestière avec une biomasse totale de 55 t/ha correspondant à une proportion de 13 % (Fig. 24).

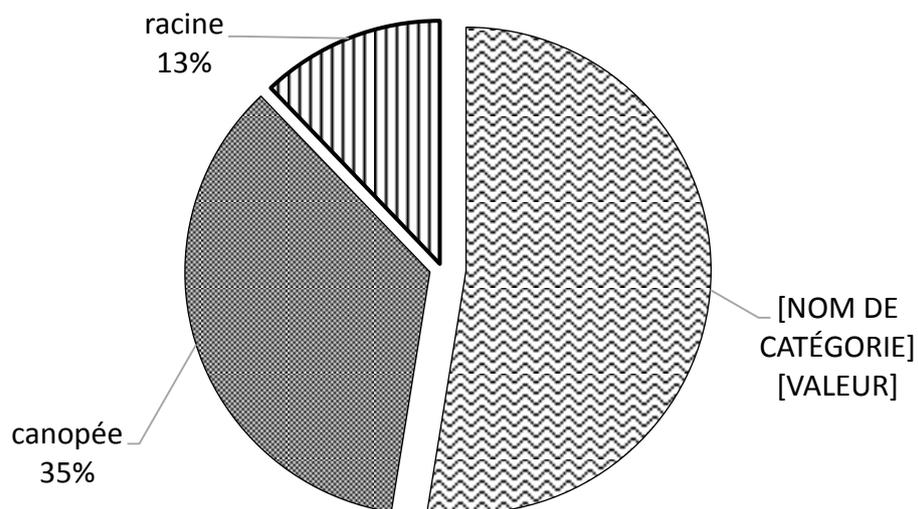


Fig. 24. Proportion de la biomasse à l'hectare en fonction des compartiments de l'arbre

III.1.4.1.4. Contribution de la biomasse par compartiment en fonction des classes de diamètre

L'estimation de la biomasse en fonction des cinq classes de diamètre (Tableau XVI), montre que la biomasse racinaire de la classe $1 \leq \text{dhp} < 10$ cm considérée ici comme les individus ligneux du sous-bois forestier (22 %) est plus élevée que dans les autres classes de diamètre ou elle varie de 12 - 14 %. La proportion de biomasse du tronc à la biomasse totale, par classe de diamètre est similaire pour les classes $1 \leq \text{dhp} < 10$ cm (48 %) et $\text{dhp} \geq 90$ cm (47 %). Cette proportion de la biomasse du tronc décroît faiblement entre les classes $10 \leq \text{dhp} < 30$ (57 %), $30 \leq \text{dhp} < 60$ (55 %) et $60 \leq \text{dhp} < 90$ (52 %). Toutefois, la biomasse du tronc était plus importante dans la classe de diamètre $30 \leq \text{dhp} < 60$ cm (71 t/ha, soit 32 % de la biomasse du tronc totale).

La proportion de la biomasse dans la canopée varie légèrement de façon croissante du sous-bois vers les classes de diamètre supérieures soit de 30 %, 31 %, 33 %, 36 %, 39 % respectivement dans les classes de $1 \leq \text{dhp} < 10$ cm, $10 \leq \text{dhp} < 30$, $30 \leq \text{dhp} < 60$, $60 \leq \text{dhp} < 90$ et $\text{dhp} \geq 90$ cm.

La classe de diamètre $1 \leq \text{dhp} < 10$ cm qui représente 93 % de la densité totale, a la plus faible biomasse totale (23 t/ha). La biomasse totale la plus élevée a été obtenue dans la classe de diamètre $30 \leq \text{dhp} < 60$ cm (128 t/ha).

La contribution de la biomasse de la classe de diamètre dominante de la forêt ($\text{dhp} > 60$ cm) dont la densité est de 33 tiges/ha, est de 51 % (racine), 48 % (tronc) à 54 % (canopée) (Tableau XVI).

Tableau XVI. Compartimentation de la biomasse (t/ha) sur l'arbre en fonction des classes de diamètre

Classe de diamètre (cm)	Tiges/ha	Racine (t/ha)	Tronc (t/ha)	Canopée (t/ha)	Biomasse totale (t/ha)
$1 < \text{dhp} < 10$	5333	5	11	7	23
$10 \leq \text{dhp} < 30$	273	7	33	18	58
$30 \leq \text{dhp} < 60$	103	15	71	42	128
$60 \leq \text{dhp} < 90$	25	15	63	44	122
$\text{dhp} \geq 90$	8	13	42	35	90
Total	5742	55	220	146	421

De façon générale, plus le diamètre de l'arbre augmente, plus la contribution des racines à la biomasse racinaire totale augmente de 9 % pour la classe de $dhp < 10$ cm à 27 % pour la classe $30 \leq dhp < 60$ cm et diminue de 24 % pour la classe $dhp \geq 90$ cm. Pour la canopée, la contribution des classes de diamètre à la biomasse de ce compartiment augmente avec le diamètre de l'arbre. Elle passe ainsi de 5 %, 12 %, 29 %, 30 %, 24 % respectivement pour les classe de $1 \leq dhp < 10$ cm, $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$, $60 \leq dhp < 90$ et $dhp \geq 90$ cm. La biomasse du tronc quant à elle augmente de 5 %, 15 %, 32 % respectivement pour les classe $1 \leq dhp < 10$ cm, $10 \leq dhp < 30$ et $30 \leq dhp < 60$ cm ; puis diminue de 29 % à 19 % pour les classes $60 \leq dhp < 90$ et $dhp \geq 90$ cm.

Ces informations justifient l'allure de la courbe de la figure 25 où la biomasse du tronc, de la canopée et des racines ont une forme en cloche avec un pic pour les classes $30 \leq dhp < 60$ cm pour le tronc et les racines et $60 \leq dhp < 90$ cm pour la canopée. Ce qui est contraire à la courbe du nombre de tiges à l'hectare qui se présente sous forme d'un J « renversé » justifiant sa diminution avec l'augmentation des classes de diamètre.

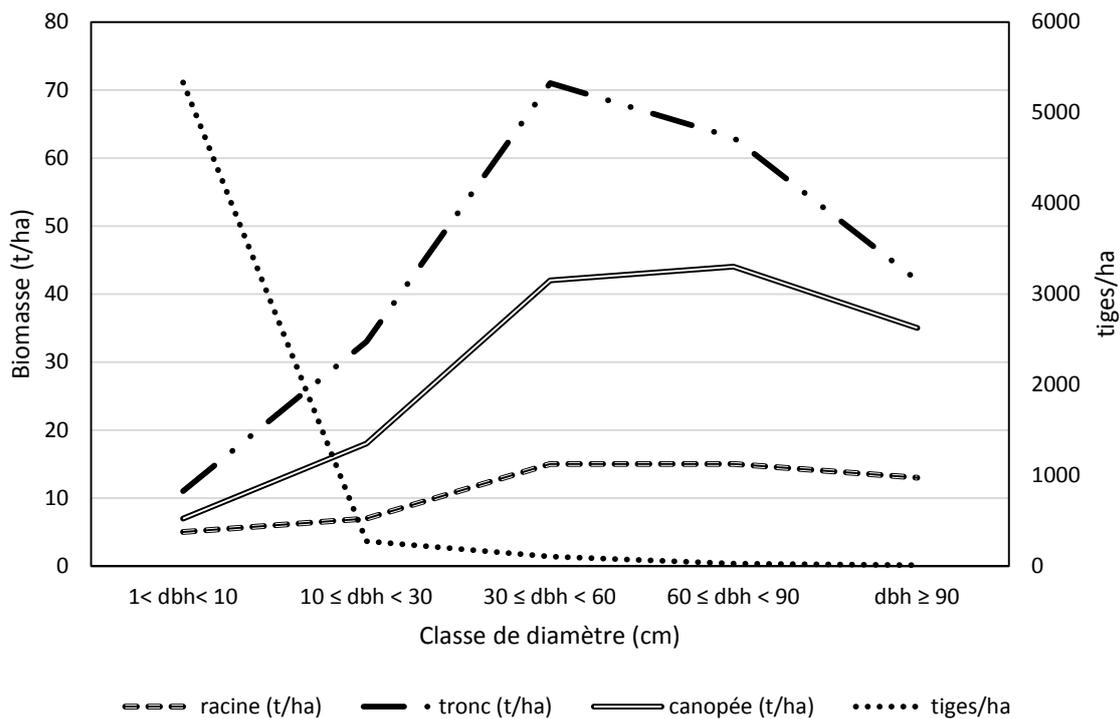


Fig. 25. Evolution des quantités de biomasse des compartiments de l'arbre et du nombre de tiges en fonction des classes de diamètre

III.1.4.1.5. Biomasse épigée en fonction des équations locales, pantropicales et autres équations utilisables dans la zone d'étude

III.1.4.1.5.1. Comparaison en fonction des classes de diamètre

Pour la classe $1 \leq dhp < 10$ cm, la biomasse varie peu en fonction des équations considérées (11 - 15 t/ha). Bien qu'ayant le nombre de tiges le plus élevé (5333 N/ha), c'est la classe de diamètre qui contribue le moins à la biomasse épigée forestière (3 - 4 %). Les arbres de $dhp \geq 10$ cm (409 N/ha) ont une biomasse qui représente 96 - 97 % de la biomasse épigée forestière totale. La contribution des classes de diamètre $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$, $60 \leq dhp < 90$, $dhp \geq 90$ cm à la biomasse épigée forestière totale dans cette étude est respectivement de 11 - 13 %, 28 - 32 %, 30 - 31 % et 21 - 27 % suivant les 8 équations considérées. La classe de diamètre ($dhp > 60$ cm) dominante de la forêt (33 N/ha) selon ces équations, contribue en moyen à 54 % (51 - 58 % selon le choix de l'équation) à la biomasse épigée forestière totale.

De façon spécifique, la proportion de la biomasse en fonction de l'équation spécifique à la zone d'étude (Djomo & Chimi, 2017) augmente successivement de 3 % (11 t/ha), 11 % (38 t/ha), 28 % (100 t/ha) et 31 % (112 t/ha) respectivement pour les classes de $1 \leq dhp < 10$ cm, $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$, $60 \leq dhp < 90$ cm puis diminue de 24 % (97 t/ha) pour la classe $dhp \geq 90$ cm. Les mêmes tendances ont été obtenues avec les équations de Chave et *al.* (2005), Chave et *al.* (2014), Fayolle et *al.* (2013), Djomo et *al.* (2016) et Djomo et *al.* (2016)_générale. Par contre avec l'équation de Djomo et *al.* (2010), la biomasse augmente dans les trois premières classes (soit de 3 %, 13 t/ha), 12 % (54 t/ha) et 32 % (142 t/ha) respectivement pour les classes de $1 \leq dhp < 10$ cm, $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$ cm puis diminue de 31 % (136 t/ha) à 21 % (101 t/ha) pour les classes de $60 \leq dhp < 90$ cm et $dhp \geq 90$ cm. Ces mêmes tendances ont été obtenues avec l'équation de Ngomanda et *al.* (2014) ou la biomasse épigée augmente de 4 % (11 t/ha), 13 % (35 t/ha), 32 % (83 t/ha) pour les classes $1 \leq dhp < 10$ cm, $10 \leq dhp < 30$, $30 \leq dhp < 60$ cm ; puis diminue de 30 % (78 t/ha) à 21 % (54 t/ha) pour les classes de $60 \leq dhp < 90$ et $dhp \geq 90$ cm (Tableau XVII).

Tableau XVII. Biomasses estimées (t/ha) en fonction des équations existantes utilisées

Classe de diamètre (cm)	Djomo & Chimi (2017)	Chave <i>et al.</i> (2005)	Chave <i>et al.</i> (2014)	Djomo <i>et al.</i> (2010)	Fayolle <i>et al.</i> (2013)	Ngomanda <i>et al.</i> (2014)	Djomo <i>et al.</i> (2016)	Djomo <i>et al.</i> (2016) générale
1 < dhp < 10	11	14	12	13	15	11	13	14
10 ≤ dhp < 30	38	49	44	54	48	35	44	42
30 ≤ dhp < 60	100	127	108	142	123	83	109	106
60 ≤ dhp < 90	112	132	106	136	129	78	114	115
dhp ≥ 90	97	101	75	92	101	54	88	96
Total	358	423	345	437	416	261	368	373

III.1.4.1.5.2. Comparaison en fonction des biomasses épigées moyennes à l'hectare

La biomasse épigée varie de 261 à 437 t/ha en fonction des équations allométriques utilisées (Tableau XVIII, Fig. 26). La biomasse estimée à partir des équations spécifiques à la zone d'étude (Djomo & Chimi, 2017) a donné une valeur moyenne de 358 t/ha. L'estimation de biomasse la plus faible a été obtenue avec l'équation de Ngomanda *et al.* (2014) ; soit 261 t/ha et la plus élevée avec l'équation de Djomo *et al.* (2010) ; soit 437 t/ha.

Le test d'ANOVA a montré que la biomasse épigée est significativement différente en fonction de l'équation choisie ($p=0,00143$). Le test de Turkey's qui permet de faire les comparaisons deux à deux ne montre aucune différence significative entre l'équation spécifique à la zone d'étude et les 7 autres équations (Fig. 26). Toutefois, une différence significative a été trouvée entre la biomasse estimée à partir de l'équation de Ngomanda *et al.* (2014) (Y6) et celle estimée à partir des équations de Chave *et al.* (2005) (Y2), Djomo *et al.* (2010) (Y3) et Fayolle *et al.* (2013) (Y4).

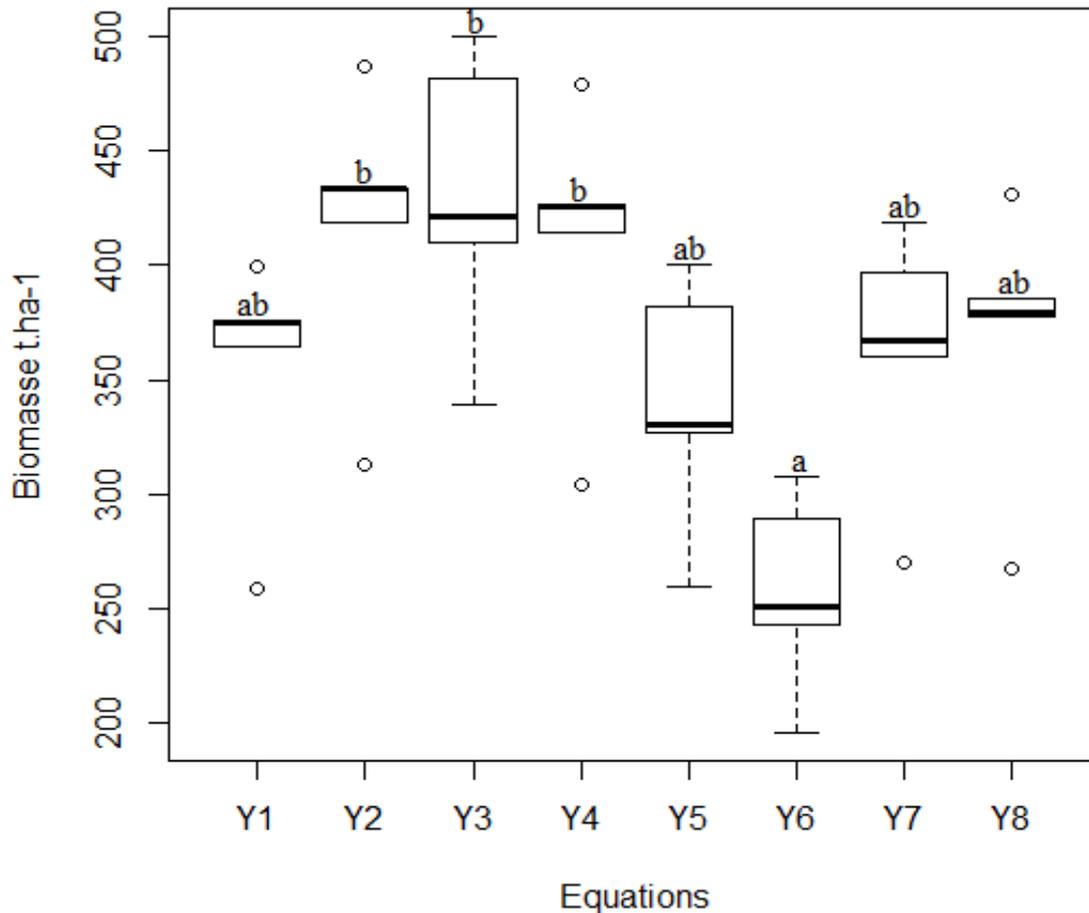


Fig. 26. Comparaison de la biomasse estimée en fonction des 8 équations considérées sur la base des tests d'ANOVA. Y1= Moyenne Djomo & Chimi (dhp, (dhp_ρ : 2017); Y2= Chave *et al.* (2005); Y3=Djomo *et al.* (2010) ; Y4= Fayolle *et al.* (2013) ; Y5=Chave *et al.* (2014); Y6= Ngomanda *et al.* (2014); Y7= Djomo *et al.* (2016) ; Y8=Djomo *et al.* (2016)_générale. Les lettres a et b sont les résultats des comparaisons statistiques 2 à 2 pour $p < 0,05$. Deux lettres identiques apparaissant sur 2 box plots différents montrent que leur biomasse n'est pas significativement différente ; par contre, deux lettres différentes montrent qu'il y'a une différence significative.

III.1.4.2. Teneur en carbone forestier dans la zone d'étude

La teneur en carbone dans la zone d'étude varie de 25,0 à 75,8 % pour une moyenne de 45,5%. Toutefois, au vu de la figure 27, un seul échantillon avait une teneur en carbone supérieure à 55 % et 2 échantillons avaient une teneur en carbone inférieure à 30 %. Un pourcentage de 96 % des échantillons considérés ont eu une teneur en carbone comprise entre 30 – 60 %. De ce fait, pour chaque arbre dont la biomasse est connue, la quantité de carbone peut se déterminer à partir du coefficient 0,46. La formule suivante peut donc être recommandée pour les études d'estimation des stocks de carbone dans la zone d'étude à partir de la biomasse estimée : Stock de carbone = Biomasse \times 0,46.

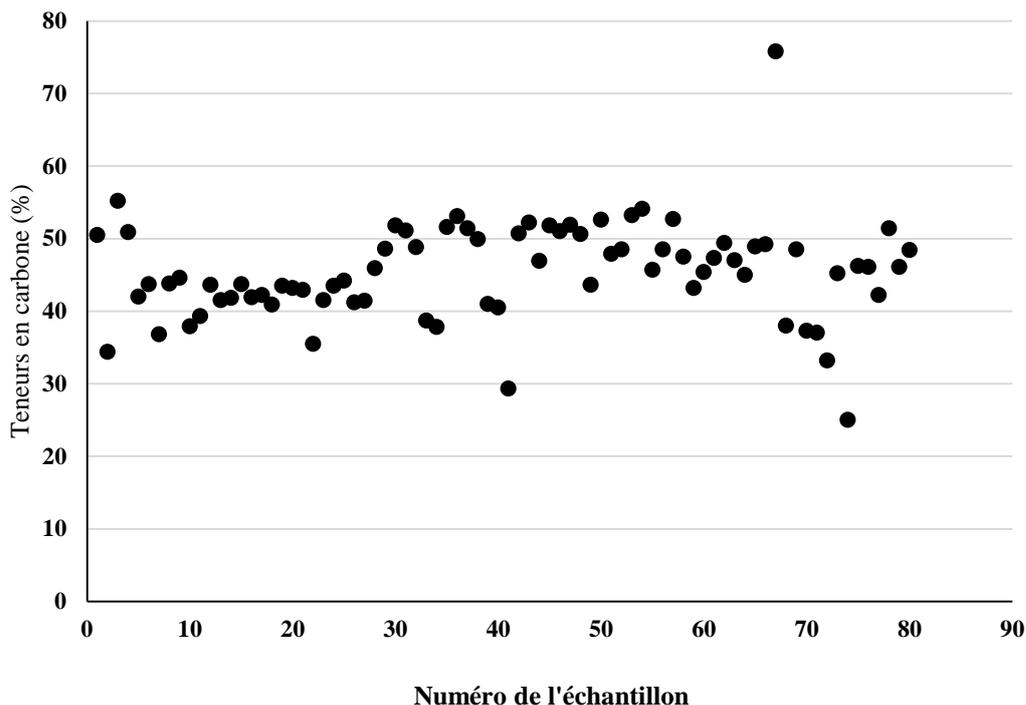


Fig. 27. Nuage de points de la teneur en carbone de 80 échantillons

III.2. DISCUSSION

III.2.1. Diversité floristique, caractérisation structurale et biomasse forestière

Contrairement à beaucoup d'études d'inventaire réalisées dans les zones forestières au Cameroun, cette étude a pris en compte la diversité des arbres de dhp < 10 cm (1 à 10 cm). Ainsi, 30 espèces de dhp < 5 cm ont été identifiées, 24 espèces pour la classe $5 \leq \text{dhp} < 10$ cm et 127 espèces de dhp ≥ 10 cm. Ce résultat (dhp ≥ 10 cm) est en concordance avec l'étude de Djomo et *al.* (2011) qui ont trouvé 145 espèces dans les forêts tropicales humides du Sud-Ouest Cameroun et aux 105 espèces trouvées par Djomo (2015a) dans l'arrondissement de Yokadouma à l'Est Cameroun. Toutefois, cette diversité reste inférieure aux 207 et 205 espèces inventoriées respectivement par Djuikouo et *al.* (2010) dans les forêts de terre ferme de la périphérie de la Réserve de Faune du Dja (RFD) et par Tabue et *al.* (2016) dans la partie Est de la même réserve. Cette étude ayant été réalisée comme celles de ces deux auteurs dans les zones présentant les mêmes conditions écologiques (Anonyme, 2012), les différences observées pourraient être dues aux méthodologies utilisées. En effet, Djuikouo et *al.* (2010) ont utilisé des parcelles carrées de 1 ha alors que la présente étude a utilisé des parcelles rectangulaires de 250 m x 20 m. De même, Tabue et *al.* (2016) bien qu'ayant utilisé des transects de 2500 m x 20 m, ont travaillé sur une superficie de 50 ha contrairement à 3,5 ha

pour la présente étude. Du point de vue famille floristique l'abondance des familles telles que les Meliaceae, les Malvaceae, les Fabaceae, et les Euphorbiaceae trouvées dans la zone d'étude corroborent avec celles obtenues par Sonké (2004) et Tabue et *al.* (2016) dans la RFD.

Une meilleure caractérisation floristique d'un peuplement végétal se fait sur la base de l'interprétation des indices de diversité (Sonké, 2004 ; Mbololo et *al.*, 2016), les indices de diversité considérés dans cette étude étaient outre la richesse spécifique, l'indice de diversité de Shannon, l'équitabilité de Piérou et de l'indice de Simpson. Comme l'a montré Djuikouo et *al.* (2010) dans la RFD, la valeur élevée de l'indice de Shannon (3,88) de cette étude pour la classe de diamètre ≥ 10 cm témoigne d'une riche diversité floristique de ce massif floristique. Toutefois, les valeurs de l'équitabilité de Piérou et l'indice de Simpson justifient la représentativité de la flore par quelques espèces du point de vue de leur abondance (Sonké, 2004). McElhinny et *al.* (2005) montre que les indices de diversité tels que Shannon, Simpson, Piérou sont seulement des éléments de mesure et de caractérisation de la biodiversité; mais ne peuvent pas donner des renseignements sur la structure de la forêt. C'est la raison pour laquelle les données du diamètre moyen et dominant, de la surface terrière moyenne et dominante, de la hauteur moyenne et dominante, de la distribution diamètre telles que suggérées par plusieurs auteurs (Lewis et *al.* 2013 ; Djomo, 2015a,b), ont été utilisées pour analyser la structure de la végétation de la forêt.

L'UFA 10 065 est une unité forestière d'aménagement qui avait été longtemps exploitée dans le passé. En milieu naturel, après les perturbations anthropiques, l'écosystème pourrait se reconstituer car les clairières créées favorisent la régénération naturelle par le développement de la banque de graines contenue dans le sous-bois (Nguenang et *al.*, 2010). Ceci expliquerait l'abondance des tiges/ha de la classe de diamètre < 5 cm et donc une forte diminution du nombre de tiges à l'hectare à mesure que le diamètre ou les classes de diamètre augmentent. Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs auteurs dans plusieurs écosystèmes forestiers et agrosystèmes (Djomo et *al.*, 2011; Djomo, 2015a; Tabue et *al.*, 2016; Zapfack et *al.*, 2016). Plus l'écosystème est perturbé, plus le nombre de tiges à l'hectare est élevé dans les classes de diamètre inférieures (Djomo et *al.*, 2011). Selon les travaux de Jiagho et *al.* (2016), l'allure de la courbe en « J » renversée est le signe d'une vigueur écologique et la garantie de la pérennité du peuplement de l'écosystème considéré car les jeunes individus assurent spontanément le remplacement des individus sénescents.

La densité de 409 tiges/ha pour les arbres de diamètre ≥ 10 cm est proche des 426 et 460 tiges/ha trouvées par Lewis et *al.* (2013) et Djuikouo et *al.* (2010) respectivement dans

les forêts tropicales africaines non perturbées et dans la réserve de Faune du Dja, ce qui démontre une similitude en dépit du fait qu'il s'agit des réserves forestières et des aires protégées contrairement à une unité forestière d'aménagement comme c'est le cas dans la présente étude.

Pour les forêts tropicales d'Afrique, la surface terrière moyenne des arbres de $d_{hp} \geq 10$ cm a été estimée à 30,3 m²/ha (Lewis et al., 2013). La surface terrière moyenne de cette étude (41,60 m²/ha) supérieure à cette valeur serait due à la prise en compte de tous les arbres de diamètre ≥ 1 cm. En considérant la classe de diamètre ≥ 10 cm, la surface terrière de 36,75 m²/ha trouvée se rapproche de 37,5 et 30,5 m²/ha trouvés par Djuikouo et al. (2010) respectivement dans les forêts à dominance de *Gilbertiodendron dewevrei* et dans les forêts de terre ferme de la RFD et des 35,3 m²/ha trouvées dans les forêts communales de Yokadouma (Djomo, 2015b). Toutefois, cette étude a permis de confirmer l'augmentation de la surface terrière avec le diamètre de l'arbre car pour des faibles classes de diamètre, malgré l'abondance du nombre de tiges/ha, la surface terrière était faible et inversement les classes de diamètre élevées qui ont un faible nombre de tiges/ha avaient la surface terrière plus élevée. Des résultats similaires ont été trouvés par Djomo (2015b). En fait, plus un arbre croit, plus il occupe d'espace et plus important est sa surface terrière.

III.2.2. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse

III.2.2.1. Densité du bois

La densité du bois est un excellent indicateur de la quantité du bois présent dans un échantillon et de la maniabilité du matériau (Trugilho et al., 1990). Elle est liée à d'autres propriétés physico-chimiques et biologiques comme la résistance, la porosité, l'organisation des éléments anatomiques, le nombre, la taille et la composition chimique des cellules lesquelles dépendent de l'espèce considérée (Kollmann & cote, 1968; Trugilho et al., 1990; Simpson et TenWolde, 1999; Ilic et al., 2000; Hacke et al., 2001). Dans le cadre de cette étude, les valeurs de densité du bois trouvées dans cette étude varient de 0,295 à 0,912 avec une moyenne 0,561 pour la zone d'étude. Ces résultats corroborent avec d'autres études menées dans les forêts tropicales telles que ceux obtenus par Henry et al. (2010) dans les forêts denses sèches du Ghana et où la densité du bois varie de 0,11 à 1,01 avec une moyenne de 0,59. De même, selon Fayolle et al. (2013) dans les forêts denses humides de la région du Sud-Ouest du Cameroun, la densité du bois varie de 0,284 à 1,152 avec une moyenne de 0,63. Toutefois, cette valeur moyenne reste inférieure à la densité moyenne de 0,70 trouvée par

Fearnside (1997) dans les forêts amazoniennes. En effet, comme l'a suggéré Henry et al. (2010), la densité du bois en Afrique tropicale reste inférieure à celles des forêts tropicales amazoniennes lorsqu'on considère une même espèce ou une même famille spécifique.

Pour Nogueira et al. (2005), la réduction des erreurs dans l'estimation de la biomasse forestière peut être marquée lorsque la variable densité du bois est prise en compte dans le modèle. Dans ce sens, Fearnside (1997) et Zanne et al. (2009) ont mis en évidence la nécessité de développer des bases de données de densité du bois des forêts tropicales. La densité du bois est perçue comme l'un des meilleurs estimateurs de la prédiction de la biomasse. Toutefois, pour Henry et al. (2010), déterminer ces densités du bois sans tenir compte de leur variation au sein même d'un individu rend les résultats encore médiocres. Ces observations ont été confirmées dans cette étude où, il a été constaté que la densité des espèces analysées variait significativement d'une part, entre espèces différentes et d'autre part au sein d'un individu de la base de l'arbre jusqu'au sommet (branches). Au stade de l'individu, on a observé une diminution moyenne de 15 % de la base au sommet de l'arbre avec une valeur extrême de 37 %. Ce résultat corrobore avec celui de Nogueira et al. (2005) qui indiquent que la densité de 87 % des arbres étudiés diminuait du bas vers le sommet avec une variation extrême de 57 %. Les variations majeures de l'environnement (abiotiques et biotiques) telles que les contraintes physiologiques, mécaniques, anatomiques, génétiques et morphologiques observées au sein d'un peuplement forestier expliqueraient les causes de ces variations de la densité des espèces (Wiemann & Williamson ; 1989 ; Fearnside, 1997 ; Nogueira et al., 2005 ; Henry et al., 2010).

Au vu la diminution de la densité du bois verticalement de la base vers les branches de l'arbre, il s'avère nécessaire et même primordial que la considération de la densité moyenne devant être utilisée dans le développement des allométries prenne en compte ces variations comme cela a été le cas dans cette étude. En effet, la moyenne de la densité du bois des trois niveaux de collecte sur l'arbre a été utilisée dans le développement des allométries d'estimation des variables à expliquer considérées dans le cadre de cette étude.

De ces densités du bois, celles de 10 espèces ont été absentes de la base de données « Global Wood Density » de Zanne et al. (2009) d'où la contribution de cette étude à la connaissance de la densité du bois de certaines espèces forestières. Il s'agit des espèces suivantes : *Trichilia rubescens*, *Greenwayoderdron suavealens*, *Piptostigma* sp, *Annickia chlorantha*, *Ghyphae brevis*, *Mallotus oppositifolium*, *Microdesmis puberula*, *Lasiodiscus manni*, *Scyphocyse manniana* et *Rhabdophyllum arnoldianum*.

III.2.2.2. Equations allométriques d'estimation de la biomasse épigée

Les études sur les équations allométriques pour estimer la biomasse épigée des arbres ont montré que les équations allométriques spécifiques à l'espèce fournissaient des résultats précis et plus fiables comparées aux équations allométriques mixtes ou pantropicales (Nelson et al., 1999 ; Basuki et al., 2009 ; Chave et al., 2014 ; Djomo et al., 2016). Dans les régions tropicales où la biodiversité et la capacité de régénération sont élevées, il est difficile de développer des équations allométriques spécifiques à chaque espèce dans un écosystème forestier. De plus, des études antérieures ont démontré que l'intégration du diamètre, de la hauteur des arbres et de la densité du bois permet de saisir ou de prendre en compte toute la variabilité des espèces des arbres sur un site et de fournir une meilleure estimation de leur biomasse (Djomo et al., 2010 ; Vieilledent et al., 2012 ; Ngomanda et al., 2014). En cohérence avec les études précédentes dans les tropiques, cette recherche a opté pour les équations allométriques des espèces mixtes pour le site d'étude avec une possibilité d'application dans les écosystèmes forestiers similaires. Ainsi, 237 arbres (dhp variant entre 1 et 121 cm) ont été prélevés dans les parcelles d'échantillonnages, le long des routes forestières créées lors des activités d'exploitabilité du bois d'œuvre ou alors sur les arbres exploitées par la société forestière en place (La Cotière Forestière). Cela a permis de minimiser l'impact de cette étude sur l'environnement. Contrairement à la plupart des études qui ne tiennent compte que du dhp, de la hauteur des arbres et de la densité du bois pour estimer la biomasse forestière (e.g. Chave et al., 2005, Djomo et al., 2010,2016 ; Vieilledent et al., 2012 ; Vahedi et al., 2014 ; Fayolle et al., 2013), cette étude a montré l'importance d'introduire le diamètre de la couronne dans les modèles de prédiction de la biomasse des arbres dans les forêts mixtes tropicales humides (Goodman et al., 2014 ; Ploton et al., 2016). De même, les études de Xu et al. (2015) dans les forêts subtropicales de Chine, ont montré que le modèle qui prend en compte les quatre variables (dhp, densité du bois, hauteur et diamètre de la couronne) donne le meilleur ajustement d'estimation de la biomasse épigée.

L'avancée récente en matière de télédétection a fait de cette discipline un outil primordial de surveillance du carbone forestier (Saatchi et al., 2011 ; Baccini et al., 2012 ; Avitabile et al., 2016). En particulier, le Balayage Laser Aéroporté (BLA) permet de reconstituer en détail la structure 3D des paysages forestiers entiers à l'aide des scanners laser à haute fréquence montés sur des avions ou des véhicules aériens télécommandés (Asner & Mascaro, 2014 ; Asner et al., 2014). Ainsi, il est maintenant possible de mesurer des arbres individuels en utilisant la BLA (Yao et al., 2012 ; Duncanson et al., 2014 ; Badreldin et

Sanchez, 2015 ; Shendryk et *al.*, 2016 ; Jucker et *al.*, 2016). Pour tenir compte de cette évolution significative dans la surveillance de la biomasse, cette étude a intégré le diamètre de la couronne comme un paramètre primaire indépendant dans l'estimation de la biomasse forestière. Des équations spécifiques au site développées pour mesurer la biomasse épigée ont été établies à partir de 237 arbres de 1 à 121 cm de diamètre pour les applications à la télédétection. Le modèle ayant seulement le diamètre de la couronne a donné un niveau de prédiction acceptable pour l'estimation de la biomasse aérienne (AIC=50 ; Adj.R²=0,873). Toutefois, l'ajout de la hauteur totale a amélioré le modèle (AIC=-160 ; Adj.R²=0,948). Cependant, l'ajout de la densité du bois au diamètre de la couronne seul ou en combinaison avec le diamètre et la hauteur totale n'a pas amélioré le modèle (Adj.R²=0,873), ce qui suggère que la densité du bois n'était pas un bon prédicteur dans ce cas. Selon le capteur utilisé, la hauteur des arbres pourrait être difficile à mesurer avec des données de télédétection. Les tests de validation ont montré que les équations avec seulement le diamètre de la couronne comme variable explicative ont donné des meilleures estimations de la biomasse totale et moyenne de la zone d'étude. Cette équation pourrait être utilisée en combinaison avec les données de télédétection pour les évaluations de la biomasse et des changements de biomasse (Kwak et *al.*, 2007 ; Lu et *al.*, 2016).

III.2.2.3. Equations allométriques d'estimation de la biomasse des compartiments de l'arbre

L'abattage des arbres entraîne le plus souvent une perte totale ou partielle de nombreuses branches. En outre, peser toutes les branches sur le terrain pour tous les arbres échantillonnés est difficile. Par conséquent, cette étude a opté pour la sélection aléatoire de grandes branches (≥ 8 cm) qui ont été utilisées pour développer les équations allométriques pour l'estimation de la biomasse des branches manquantes à partir de données de diamètre basal et de densité du bois. Le diamètre basal des branches apparaît comme un bon prédicteur de la biomasse des branches (Vahedi et *al.*, 2014) ; mais l'ajout de la variable explicative densité du bois dans le modèle améliore cette prédiction. Bien que dans cette étude, la longueur des branches n'a pas été prise en compte dans ces allométries, les travaux de Henry et *al.* (2010), ont montré qu'en plus du diamètre de basal de la branche et de la densité du bois, l'introduction de cette 3^{ème} variable dans le modèle pourrait donner des résultats plus précis. Pour les petites branches de diamètre basal < 8 cm, elles ont été pesées directement sur le terrain.

La considération des compartiments de l'arbre séparément peut être utile surtout dans les forêts tropicales humides d'Afrique Centrale où la plupart des données des inventaires forestiers fournissent seulement le volume du fût. Ce volume du fût peut être converti en biomasse connaissant sa densité du bois (Brown et *al.*, 1989). Cette biomasse peut être combinée avec les équations allométriques des différents compartiments pour obtenir la biomasse de la couronne et la biomasse totale (épigée et hypogée) (Djomo, 2015a). Tous les modèles logarithmiques utilisés dans cette étude pour l'estimation de la biomasse couronne ont donné un $Adj.R^2 > 0,9$; ces résultats sont similaires à ceux de Ploton et *al.* (2016) lorsqu'ils ont utilisé le dhp, la hauteur de la couronne et la densité du bois comme variables prédictives. Cependant, ces résultats ont montré l'importance de prendre en compte le diamètre de la couronne comme prédicteur pour l'estimation de la biomasse de la couronne. Dans le cas de cette étude, le dhp et le diamètre de la couronne comme variables prédictives ont permis d'avoir une meilleure prédiction de la biomasse de la couronne par rapport à la combinaison du diamètre, de la hauteur totale et de la densité du bois. L'ajout de la hauteur totale ou de la hauteur de la couronne, de la densité du bois, du diamètre et du diamètre de la couronne n'a que légèrement augmenté la prévision de la biomasse de la couronne ; montrant ainsi que le diamètre et le diamètre de la couronne étaient de bons prédicteurs de la biomasse de la couronne. La validation à partir des données de biomasse ont montré que l'équation avec pour variable prédictive le diamètre de l'arbre donne des estimations meilleures. La qualité de l'ajustement pour la prédiction de la biomasse du tronc était meilleure lorsque le diamètre était considéré comme prédicteur. Le meilleur modèle pour la biomasse du tronc a été obtenu quand le diamètre et la hauteur du tronc sont pris en compte.

Le système racinaire est important en écologie forestière car il peut stocker entre 30 et 80 % de la biomasse totale (Djomo, 2015; Malinovski et *al.*, 2016). La connaissance de leur dynamisme est essentielle pour comprendre leur contribution dans le stockage du carbone et leur capacité à absorber les émissions de carbone atmosphérique afin d'atténuer les impacts du changement climatique (Helmisaari et *al.*, 2007). Cependant, très peu d'études sont disponibles sur la quantification de leur biomasse, en particulier dans les forêts tropicales humides d'Afrique centrale, en raison des difficultés de leur extraction du sol (Djomo, 2015). Le dhp des arbres était un bon prédicteur de la biomasse souterraine. L'introduction de la densité du bois a amélioré cette prédiction. Toutefois, la validation avec les données de biomasse observées ont montré que l'équation allométrique avec le diamètre comme prédicteur a donné la meilleure estimation avec une erreur de -0,17 %.

La biomasse souterraine est souvent absente dans la plupart des données, seule la biomasse aérienne est le plus souvent étudiée et la biomasse souterraine est généralement obtenue à partir d'une constance dépendant de la biomasse épigée appelé ratio (Mokany et *al.*, 2006) et défini par : biomasse hypogée = ratio*biomasse épigée (Sanquetta et *al.*, 2011). En effet, le développement des plantes en surface est lié au développement du système racinaire qui est nécessaire pour son approvisionnement hydrominéral et les activités photosynthétiques. Les biomasses racinaires et épigées sont donc dépendantes l'une de l'autre (Mokany et *al.*, 2006 ; Green et *al.*, 2004, Helmisaari et *al.*, 2007 ; Wang et *al.*, 2011 ; Malinowski et *al.*, 2016). Des recherches bibliographiques effectuées, aucun travail/étude n'a rapporté jusqu'ici des équations allométriques pour l'estimation de la biomasse totale (épigée et hypogée) dans les forêts tropicales humides d'Afrique centrale. Dans le cas de cette étude, seuls 13 arbres de diamètre allant de 5 à 30 cm ont tous les compartiments (biomasse aérienne et souterraine). Cet ensemble de données a été utilisé pour développer des équations allométriques pour estimer la biomasse totale des arbres. En raison de données limitées contribuant à ces équations, l'applicabilité est principalement pour la comparaison et la littérature. De même que la biomasse aérienne, le diamètre était un bon estimateur de la biomasse totale des arbres. Avec une erreur moyenne de + 0,49 %, le modèle où le diamètre de l'arbre et le diamètre de la couronne étaient pris en compte, était le plus précis dans l'estimation de la biomasse totale en application aux études de télédétection en comparaison au modèle dont les prédictors étaient le diamètre et la densité du bois lequel avait une erreur moyenne 0,62 %.

III.2.2.4. Equations allométriques d'estimation de la hauteur et du diamètre de la couronne de l'arbre

Dans les conditions des forêts tropicales humides, le diamètre de la couronne et la hauteur totale des arbres sont difficiles à mesurer sur le terrain en raison de nombreux facteurs tels que la canopée trop étroite, les arbres de grande taille, la difficulté à voir le sommet des arbres, la surestimation de la hauteur totale, la forme de l'arbre, etc. (Djomo, 2015a). En outre, la conversion du diamètre de l'arbre mesuré sur le terrain en diamètre de la couronne peut être utile pour des applications de télédétection. Par conséquent, développer des équations allométriques pour estimer la hauteur totale de l'arbre et le diamètre de la couronne peut aider à ajouter ces paramètres dans la base de données lorsqu'ils sont absents (Basuki et *al.*, 2009). Toutefois, il est bien de noter que l'utilisation des équations allométriques pour l'estimation des paramètres manquants pourrait augmenter les erreurs de prédiction de la biomasse

(Djomo et *al.*, 2016). Dans le cas de cette étude, il a été montré que le diamètre de l'arbre à lui seul était un bon prédicteur de la hauteur totale. La validation avec les données originelles ont montré que le simple model $H = a + b \times D$ a donné une estimation plus précise de la hauteur totale avec une erreur moyenne de 0,04 %. Dans le cas du diamètre de la couronne, la transformation logarithmique avec le diamètre était équivalente à l'équation ayant pour transformation logarithmique le diamètre de l'arbre et la densité du bois suggérant que la densité du bois n'a pas amélioré le modèle. Comme dans le cas de la hauteur de l'arbre, le simple model $CD = a + b \times D$ a donné une estimation plus précise de la hauteur totale avec une erreur moyenne de 0,09 %.

III.2.2.5. Comparaison des équations existantes

Différentes équations ont été développées pour l'estimation de la biomasse épigée applicable à ce site d'étude (Djomo et *al.*, 2010, 2016 ; Chave et *al.*, 2005 ; Fayolle et *al.*, 2013 ; Chave et *al.*, 2014 ; Ngomanda et *al.*, 2014). La biomasse mesurée au cours de cette étude a été utilisée pour calculer la RRMSE, l'erreur moyenne (%), la biomasse totale (kg), la biomasse moyenne (kg) et le pourcentage (rapport de la différence entre la biomasse estimée par chaque modèle et la biomasse totale et/ou moyenne mesurée) afin de tester leur fiabilité à ce site d'étude. L'équation de Djomo et *al.* (2016) a fourni le pourcentage de différence par rapport à la biomasse mesurée sur le terrain la plus faible (%) tandis que l'équation de Djomo et *al.* (2010) a eu le pourcentage de différence le plus élevé. L'équation de Chave et *al.* (2014) a fourni une meilleure estimation que l'équation de Chave et *al.* (2005) avec les faibles valeurs du RRMSE, de l'erreur moyenne et du pourcentage de différence de la biomasse totale ou moyenne. L'équation de Ngomanda et *al.* (2014) ont fourni la RRMSE et l'erreur moyenne la plus faible. Cette équation a été développée à partir 101 arbres d'une forêt spécifique à un site spécifique, semblable à la végétation de ce site d'étude.

L'équation de Djomo et *al.* (2016), qui utilisait les données recueillies à partir de différentes forêts tropicales humides en Afrique, y compris les données provenant de Fayolle et *al.* (2013) et de Ngomanda et *al.* (2013), a fourni la valeur la plus proche de la biomasse mesurée avec un rapport de différence de 0,13 % et la seconde valeur du RRMSE et de l'erreur moyenne juste après celle de l'équation de Ngomanda et *al.* (2014). Par conséquent, cette équation de Djomo et *al.* (2016) a été considérée comme la plus fiable pour ce site d'étude. Sur la base de ce résultat, cette équation était également la plus recommandée pour les forêts tropicales humides d'Afrique centrale en l'absence d'équations allométriques spécifiques au site.

III.2.3. Facteur d'expansion de biomasse et ratio pour la zone d'étude

Dans le cadre de cette étude, les arbres de diamètre compris entre 4 et 121 cm (pour une moyenne de 28 cm) ont été utilisés pour la détermination du FEB. En effet, comme l'ont montré Brown *et al.* (1989), pour la détermination d'une valeur moyenne du FEB, le diamètre moyen considéré doit être compris entre 25 et 30 cm. Pour Tobin & Nieuwenhuis (2007), le FEB augmente avec le diamètre pour les arbres de diamètre < 25 cm ; puis est compris entre 1 et 2 pour toute augmentation du diamètre des arbres de diamètre >25 cm. Ainsi, de même que Tobin & Nieuwenhuis (2007), le FEB trouvé reste compris entre 1 et 2 pour tous les grands arbres échantillonnés.

Pour Green *et al.* (2004), l'utilisation du FEB dans les études d'estimation de la biomasse forestière est une source d'incertitude dans les prédictions surtout lorsque cette constante a été établie à partir de plusieurs espèces en comparaison au cas où, elle est spécifique à une espèce donnée (Tobin & Nieuwenhuis, 2007). De ce fait, les valeurs spécifiques du FEB sont préférées car, elles réduisent considérablement les erreurs d'estimation. Cependant, en cas d'absence ou d'indisponibilité du FEB spécifique à une espèce, Brown *et al.* (1989) recommandent d'utiliser la valeur moyenne du FEB de la zone d'étude, établie au niveau national ou encore au niveau régional.

Pour Sanquetta *et al.* (2011) et Levy *et al.* (2004), la nature de l'arbre est un paramètre qui influence significativement la valeur spécifique du FEB. En effet, l'architecture des plantes varie en fonction de l'arbre et pour une même espèce, elle varie en fonction de l'écosystème et de l'âge/classe de diamètre (Goodman *et al.*, 2014). Ainsi, dans le contexte de cette étude, le FEB spécifique qui variait de 1,02 à 6,45 était fonction de l'espèce considérée. Toutefois, les fortes valeurs ayant été obtenues exclusivement pour les arbres de la strate inférieure pourrait s'expliquer par le fait qu'en raison de la concurrence pour la lumière du soleil, les petits arbres sont contraints de développer d'abord leur couronne pour maximiser la capture de la lumière du soleil laquelle est nécessaire pour leur croissance via les activités de photosynthèse (Brown & Pearson, 2005). Dans ce cas, la biomasse de leur tronc devient alors plus faible que celle de la couronne. Considérant la valeur moyenne du FEB, même si Sanquetta *et al.* (2011) ont travaillé exclusivement sur *Pinus* spp. dans les forêts tropicales amazoniennes, ils ont trouvé un FEB de 1,47 (variant de 1,09 à 3,74), ce qui est différent de la valeur de 2,18 trouvée dans cette étude pour la simple raison que cette étude a pris en compte le FEB moyen obtenu à partir de 40 espèces. Toutefois, au vu des recherches bibliographiques effectuées, aucune étude spécifique sur le FEB n'a été trouvée pour des espèces spécifiques ou

pour des espèces mixtes dans les forêts d'Afrique Centrale, malgré leur statut de deuxième bassin forestier tropical après celui de l'Amazonie (Anonyme, 2011b).

Les études portant sur la biomasse racinaire sont le plus souvent absentes dans la plupart des ensembles des données à cause des difficultés liées à leur échantillonnage (extraction) sur le terrain. Pour cela, dans la plupart du temps, le ratio est considéré comme une alternative importante pour l'estimation de la biomasse racinaire en cas d'absence des équations allométriques pour leur estimation (Kachamba et al., 2016). Dans cette étude utilisant une base de données de 12 arbres, la valeur moyenne du ratio trouvée est de 0,22. Cette valeur est similaire aux 0,23 et 0,24 trouvées respectivement par Green et al. (2004) pour l'espèce *Picea sitchensis* dans les forêts d'Irlande et par Mokany et al. (2006) pour les espèces mixtes de l'ensemble forêts tropicales. Cependant, ce ratio est inférieur à 0,36 trouvé par Tobin & Nieuwenhuis (2007) dans les forêts d'Irlande et 0,47 trouvé par Kachamba et al. (2016) dans les forêts de Miombo en Malawi. Les différences trouvées pourraient être dues à la variation des classes de diamètre (4 - 121 cm) des arbres considérés dans cette étude ; des conditions environnementales différentes régnant dans ces milieux et aussi du type de végétation ou d'écosystème où ces différentes études ont été réalisées lesquelles ont une influence significative sur la valeur du ratio (Brown et al., 1989).

Sur la base du coefficient de Pearson, la matrice de corrélation montre que : même si la corrélation est négativement entre les variables dendrométriques de l'arbre et le FEB, il est néanmoins approximativement proche de zéro. Ainsi, les variables dendrométrique des arbres n'influencent pas sur le FEB. Ces résultats sont contraires à ceux de Tobin & Nieuwenhuis (2007), où le FEB diminue avec l'augmentation du diamètre de l'arbre. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ces auteurs ont travaillé sur une seule espèce et la variation dans ce cas est liée à l'âge de l'espèce. En effet, pour une même espèce, son architecture varie jusqu'à un certain niveau de stabilité (Goodman et al., 2014). D'un autre côté, la corrélation négative trouvée était contraire à celle obtenue par Levy et al. (2004) qui en plus d'avoir trouvé une corrélation positive, ont montré que la hauteur de l'arbre est plus corrélée au FEB que les autres variables dendrométriques. Tobin & Nieuwenhuis (2007) quant à eux ont montré que l'augmentation du FEB avec les faibles classes diamètre devient sensiblement constante pour les classes de diamètre > 25 cm. Dans cette étude, le FEB de tous les grands arbres échantillonnés était compris entre 1 à 2. Les espèces dont le FEB > 3 avaient tous des diamètres < 25 cm lesquelles sont assimilées aux petits arbres de la strate inférieure dont le dynamisme de leur croissance favorise surtout le développement de la couronne aux dépens de celui du tronc.

D'autre part, Sanquetta et *al.* (2011) ont montré que dans les forêts amazoniennes, en plus de la corrélation négative entre le FEB et les variables dendrométriques de l'arbre, le FEB est plus corrélé au diamètre de l'arbre suivi de la hauteur de l'arbre et de l'âge de l'arbre, respectivement. Ces auteurs suggèrent que le diamètre de l'arbre est considéré comme la meilleure variable explicative pour la simple raison qu'il est facile à mesurer et a une plus grande précision par rapport à la hauteur totale et le diamètre de la couronne qui sont plus difficile à mesurer sur le terrain, en particulier dans les forêts tropicales (Brown et *al.*, 1989 ; Djomo, 2015a).

Pour le ratio, comme montré par Sanquetta et *al.* (2011), il a été constaté dans cette étude qu'il existe des corrélations élevées entre le ratio et les variables dendrométriques des arbres (coefficient de Pearson < -0,5). Toutefois, le ratio était plus étroitement corrélé avec la hauteur totale, que le diamètre et enfin le diamètre de la couronne. De plus, ce ratio diminue avec l'augmentation des valeurs des variables dendrométriques. En effet, pendant la croissance des plantes, les arbres ont besoin de plus de biomasse racinaire pour supporter une couronne proportionnellement grande (Goodman et *al.*, 2014). Ainsi, il existe une relation étroite entre le compartiment épigé et hypogé des arbres (Mokany et *al.*, 2006 ; Helmisaari et *al.*, 2007; Malinosvki et *al.*, 2016).

III.2.4. Biomasse et teneur en carbone forestier

Vahedi et *al.* (2014) ont montré que la contribution de la biomasse du tronc à la biomasse totale est dominante, ce qui est en accord avec les résultats de cette étude qui trouvent une proportion de la biomasse du tronc correspondant à 60 % de la biomasse épigée totale et 52 % de la biomasse totale (racine et partie aérienne). La contribution de la canopée estimée en moyenne à 36 % par Ploton et *al.* (2016) pour les forêts tropicales humides est proche des 40 % estimée par cette étude. En fonction des classes de diamètre, Ploton et *al.* (2016) ont montré que la proportion de la canopée varie de 3 % pour les petits arbres ($d_{hp} < 10$ cm) à 88 % pour les grands arbres ($d_{hp} \geq 10$ cm). Cette étude montre que la contribution de la canopée à la biomasse épigée totale varie de 35 % pour la classe de diamètre de $10 \leq d_{hp} < 30$ cm à 45 % pour le classe de diamètre $d_{hp} \geq 90$ cm.

La biomasse racinaire représente environ le quart de la biomasse forestière en zone tropicale (Green et *al.*, 2004 ; Mokany et *al.*, 2006). Cette étude montre que la biomasse racinaire contribue à environ 13 % de la biomasse totale pour un ratio entre la biomasse racinaire /biomasse épigée de 0,15.

Les équations allométriques peuvent produire des erreurs d'estimation (Henry et *al.*, 2011). La biomasse épigée estimée à partir de la sommation des équations du tronc et de la canopée (368 t/ha) est proche de celle obtenue à partir des équations estimant directement la biomasse épigée totale (358 t/ha) et est équivalent aux résultats obtenus par Djomo et *al.* (2016). Ceci corrobore avec l'étude de Ploton et *al.* (2016) qui suggèrent pour une meilleure estimation de la biomasse forestière, d'utiliser des équations distinctes pour la biomasse du tronc et de la canopée pour prendre en compte la variabilité de leur forme et réduire les erreurs d'estimation (Henry et *al.*, 2010). En effet, les allométries de la biomasse du tronc sont beaucoup plus précises en raison de sa forme presque toujours cylindrique (Henry et *al.*, 2010 ; Sillett et *al.*, 2010 ; Vahedi et *al.*, 2014). Par contre, celle de la canopée dont la forme se rapproche de celui d'un cône à base assimilée à un pentagone (Fuentes et *al.*, 2015), varie largement d'une espèce à une autre (Poudel et *al.*, 2015), avec l'augmentation du diamètre de l'arbre (Ploton et *al.*, 2016) et même en fonction du niveau de perturbation de l'écosystème (Fuentes et *al.*, 2015).

Les écarts d'estimation de biomasse épigée ont été observés de façon significative (ANOVA, $p < 0,00143$) selon le choix des équations utilisées pour son estimation (Djomo et *al.*, 2011). Selon Djomo et *al.* (2010) et Basuki et *al.* (2009), des équations allométriques spécifiques à un site et plus encore à une espèce sont celles qui sont recommandées pour l'estimation de la biomasse forestière. Toutefois, il est difficile et très coûteux d'établir des équations spécifiques à chaque zone ou même à chaque espèce; c'est la raison pour laquelle de nombreux auteurs ont développé des équations pantropicales qui incluent les données collectées dans plusieurs forêts tropicales (Chave et *al.*, 2014 ; Djomo et *al.*, 2016).

Djomo et *al.* (2016) ont élaboré des équations pantropicales africaines développées à partir des données collectées dans 5 pays africains (Cameroun, Ghana, République Démocratique du Congo, Gabon et Madagascar). Il n'y a pas eu de différence significative entre les deux équations spécifiques aux forêts tropicales humides et aux forêts mixtes testées (Djomo et *al.*, 2016) et celle de la zone d'étude. La différence de biomasse avec celle de la zone d'étude était de 2,8 % (Djomo et *al.*, 2016, forêts tropicales humides) 4,2 % (Djomo et *al.*, 2016, forêts mixtes). Cette différence était de -3,6 % (Chave et *al.*, 2014), 18,2 % (Chave et *al.*, 2005), 22,1 % (Djomo et *al.*, 2010), 16,2 % (Fayolle et *al.*, 2013), -27,1 % (Ngomanda et *al.*, 2014).

Dans les écosystèmes d'Afrique Centrale, l'équation pantropicale de Chave et *al.* (2005) est une équation qui a été jusqu'ici très utilisée pour l'estimation de la biomasse forestière (e.g. Lewis et *al.*, 2009, Djuikouo et *al.*, 2010 ; Day et *al.*, 2013 ; Noiha et *al.*,

2015). Ainsi, considérant la biomasse de la zone d'étude estimée à partir de cette équation, la valeur de 423 t/ha estimée est semblable aux valeurs de 429 t/ha et 401 t/ha trouvées respectivement par Lewis et *al.* (2013) dans quelques forêts intactes d'Afrique Centrale et par Djuikouo et *al.* (2010) dans les forêts de terre ferme de la réserve de faune du Dja en utilisant la même équation (Chave et *al.*, 2005). Ces auteurs ont considéré les arbres de $dhp \geq 10$ cm tandis que cette étude a considéré tous les arbres de $dhp \geq 1$ cm ; la contribution des arbres de $dhp < 10$ cm était en moyenne de 14 t/ha. Ceci démontre qu'il y a une surestimation de la biomasse en utilisant cette équation de Chave et *al.* (2005) qui devrait être corrigée en utilisant l'équation pantropicale de Djomo et *al.* (2016).

La teneur en carbone contenue dans le matériel végétal varie d'une espèce à une autre. Toutefois, dans un site d'étude par exemple, il est difficile voire très coûteux financièrement d'évaluer la teneur de carbone spécifique à chaque espèce identifiée. C'est la raison pour laquelle en utilisant un échantillon de quelques arbres spécifique à un écosystème, la teneur de carbone trouvée peut être applicable aux autres espèces de la zone d'étude pour estimer leur stock de carbone à partir de leur biomasse (Zapfack et *al.*, 2013 ; Noiha et *al.*, 2015) ; comme c'est par exemple le cas avec la densité du bois moyen (Henry et *al.*, 2010 ; Fayolle et *al.*, 2013). Ainsi, pour Brown & Pearson (2005) en zone tropicale, la teneur en carbone contenue dans la biomasse forestière est de 50 %. Pour Anonyme (2000), le coefficient qui permet de convertir la biomasse forestière en stock de carbone est compris entre 0,45 et 0,50 pour une moyenne de 0,47 ; ce qui correspond à un pourcentage moyen de carbone forestier de 47 % contenu dans sa biomasse. Ce coefficient moyen est similaire au coefficient moyen de 0,46 trouvé dans le cadre de cette étude lequel a été obtenu à partir de la moyenne des teneurs de carbone de 80 échantillons. Ainsi, dans la plupart des études d'estimation de la biomasse des écosystèmes dans les forêts d'Afrique Centrale, le constante utilisée pour convertir la biomasse en quantité de carbone est de 0,47 (Zapfack et *al.*, 2013, 2016 ; Noiha et *al.*, 2015 ; Tabue et *al.*, 2016). Au vu de tout ceci, spécifiquement à la zone d'étude, la formule suivante peut donc être utilisée pour l'estimation des stocks de carbone forestier :
Stock de carbone = $0,46 \times$ Biomasse.

CHAPITRE IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CHAPITRE IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

IV.1. CONCLUSION

L'implémentation du mécanisme REDD+ nécessite une estimation de la biomasse des écosystèmes. Le but de cette étude était d'établir les équations allométriques spécifiques pour l'estimation de la biomasse forestière dans la région de l'Est Cameroun essentiellement dans l'UFA 10 065 de la commune de Belabo. Cette UFA a été choisie en raison du partenariat existant entre elle, l'Université de Yaoundé 1 (Cameroun) et l'Université Queen (Canada) et aussi en raison des activités liées aux exploitations forestières qui se déroulent en son sein. En effet, la méthodologie de terrain portant essentiellement sur la méthode destructive, la réalisation de ce travail dans cette zone d'activité d'exploitation forestière a permis de limiter largement l'impact de cette étude sur l'écosystème.

Il est important de rappeler que dans le cadre de ce travail, les équations allométriques spécifiques (pour la biomasse épigée, hypogée, totale, du tronc et de la couronne) établies ont été utilisées pour l'estimation de la biomasse forestière sur la base des données d'inventaires effectuées. Cette estimation de la biomasse a été précédée par la caractérisation floristique et structurale du site d'étude. De plus, les données de biomasse ont été utilisées pour la détermination du FEB et du ratio qui sont connues comme une autre approche utilisée pour l'estimation de la biomasse à l'échelle nationale ou régionale.

Les données d'inventaires ont relevé une diversité floristique de 139 espèces de dhp ≥ 1 cm ; soit, 30 espèces de dhp < 5 cm, 24 espèces, pour la classe $5 \leq \text{dhp} < 10$ cm et 127 espèces de dhp ≥ 10 cm. Les familles les plus représentatives étaient les Meliaceae, les Rubiaceae, Moraceae, les Malvaceae et les Euphorbiaceae. L'indice de Shannon qui variait de 2,47 à 3,88 témoignait d'une riche diversité floristique dans la zone d'étude.

Le nombre de tiges de ligneux à l'hectare diminue avec l'augmentation des classes de diamètre. En effet, les arbres de dhp < 5 cm qui représentent jusqu'à 81 % (4633 tiges/ha)

permet de confirmer le fait que cette zone a été dans le passé soumise à l'exploitation forestière. Les arbres de $d_{hp} \geq 10$ cm avaient la surface terrière (36,75 m²/ha pour 409 tiges/ha) la plus élevée malgré leur faible nombre de tiges à l'hectare en comparaison aux arbres de $d_{hp} < 10$ cm (4,85 m²/ha pour 5333 tiges/ha).

Sur la base des valeurs du Adj.R², AIC, RRMSE et RSE obtenues, lorsque le diamètre, la hauteur totale, la densité du bois et le diamètre de la couronne de l'arbre sont pris en compte pour l'estimation de la biomasse épigée, la qualité de l'ajustement du modèle est meilleure. Toutefois, la validation avec les données de biomasses mesurées n'a pas confirmé ce résultat. Elle a plutôt montré que le diamètre de l'arbre est un bon prédicteur de la biomasse épigée. De même, la validation avec les données mesurées a montré que le diamètre de l'arbre est un bon prédicteur de la biomasse hypogée, de la biomasse de la couronne, de la hauteur totale et du diamètre de la couronne. Par contre, les modèles validés pour l'estimation de la biomasse du fût et de la biomasse totale dépendaient des prédicteurs diamètre - hauteur du fût et diamètre densité du bois respectivement.

La comparaison de la biomasse épigée observée dans la zone d'étude avec celle obtenue à partir d'autres équations allométriques existantes pouvant être appliquées à la zone d'étude a montré que l'équation de Djomo et *al.* (2016) était la meilleure car a donné les valeurs de biomasses les plus proches de celles mesurées sur le terrain et de ce fait, est recommandée pour les autres forêts tropicales humides d'Afrique Centrale en l'absence d'équations allométriques spécifiques.

Au niveau national ou régional, le FEB et le ratio sont considérés comme une autre approche à utiliser pour l'estimation de la biomasse. Même si les valeurs spécifiques à chaque espèce sont préférables par rapport aux valeurs moyennes, cette étude a permis de déterminer les valeurs moyennes de ces facteurs. Ainsi, le FEB et ratio obtenus sont respectivement de 2,18 et 0,22. Les variables dendrométriques de l'arbre (diamètre, hauteur totale, diamètre de la couronne) ne semblent pas avoir d'influence sur les valeurs du FEB ; par contre, le ratio diminue avec leur augmentation.

La biomasse hypogée qui le plus souvent n'est pas prise en compte dans les études d'estimation du carbone forestier du fait des difficultés liées à son échantillonnage, représente en moyenne (55 t/ha soit 13 %) de la biomasse forestière totale. Le tronc quant à lui, était le compartiment de l'arbre dont la biomasse était la plus élevée (220 t/ha soit 52 %) ; suivi de la couronne (146 t/ha soit 35 %). Que ce soit pour le tronc, la couronne ou les racines, la biomasse augmente avec les classes de diamètre. La classe de diamètre dominante de la zone

d'étude malgré le faible nombre de tiges à l'hectare (33 tiges/ha), contribue en moyenne à 52 % la biomasse épigée forestière.

Le choix de l'équation à utiliser pour l'estimation de la biomasse est primordial pour la fiabilité des résultats. En effet, les valeurs de la biomasse épigée obtenues à partir des 8 équations considérées montrent qu'il existe une différence significative entre elles. Toutefois, ces biomasses épigées estimées varient de 261 t/ha pour l'équation de Ngomanda *et al.* (2014) à 437 t/ha pour l'équation de Djomo *et al.* (2010).

La teneur en carbone (%) moyenne contenue dans les ligneux forestiers obtenue à partir des 80 échantillons est de 46 %.

Les données de biomasses présentées dans cette étude peuvent être considérées comme des efforts nécessaires pour la mise en application du processus REDD+ au Cameroun.

IV.2. PERSPECTIVES

Afin de compléter cette étude, il serait judicieux de :

- entreprendre des études similaires dans d'autres types d'écosystèmes forestiers présents au Cameroun ; dans la mesure d'établir une base de données solides pouvant être utilisée pour établir les équations allométriques générales aux forêts camerounaises ;
- faire des études comparatives d'estimation de la biomasse par télédétection et en utilisant les équations allométriques prenant en compte le diamètre de la couronne ;
- pousser l'échantillonnage sur la densité du bois ; en effet, compte tenu de la grande diversité ligneuse des forêts du bassin du Congo, la densité du bois de nombreuses d'entre elles reste encore inconnue ;
- faire des études approfondies sur le FEB et le R spécifique à chaque espèce ;
- augmenter le taux d'échantillonnage des données d'estimation de la fraction du carbone contenue dans la biomasse forestière ; dans le but d'en définir une fraction beaucoup plus précise.

BIBLIOGRAPHIE

- Akaike H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on automatic Control*, 19 (6): 716-723.
- Alvarez E., Duque A., Saldarriaga J., Cabrera K., De las Salas G., Ignacio D., Valle I., Lema A., Moreno F., Orrego S. & Rodríguez L., 2012. Tree aboveground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267 : 297–308.
- Anonyme, 2000. *A Special Report of the IPCC. Land Use, Landuse Change, and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge. 20 p.
- Anonyme, 2007. *The physical basis. Contribution of working group I to the fourth assessment Report of Intergovernment panel of Climate Change*. In Cambridge University press, Cambridge, 996 p.
- Anonyme, 2009. *Note de Synthèse N°1 : forêt et changements climatiques*. Direction générale de l'énergie et du climat, France, 28 p.
- Anonyme, 2011a. *Changements climatiques : Comprendre et réagir*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Réseau Action Climat- France, Montreuil, 48 p.
- Anonyme, 2011b. *La situation des forêts dans le bassin amazonien, le bassin du Congo et l'Asie du Sud-Est*. FAO, ITTO, Sommet des trois bassins forestiers tropicaux Brazzaville, République du Congo, 81 p.

- Anonyme, 2011c. *Terre, eau, et forêts : Ressorts d'un développement à l'épreuve du changement climatique en Afrique*. Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM), Afrique du Sud, 28 p.
- Anonyme, 2012. *Plan communal de développement de Belabo*. PNDP/IDA. Yaoundé, Cameroun, 156 p.
- Anonyme, 2015. *Cameroon's Forest estate data base*. MINFOF and World Resources Institute (WRI). Poster
- Asner G.P., Knapp D.E., Martin R.E., Tupayachi R., Anderson C.B., Mascaro J., Sinca F., Chadwick K.D., Higgins M., Farfan W., Llactayo W. & Silman M.R., 2014. Targeted carbon conservation at national scales with high-resolution monitoring. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 : 5016–5022.
- Asner, G.P. & Mascaro, J., 2014. Mapping tropical forest carbon: calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sens. Environ.* 140 : 614–624.
- Avitabile V., Herold M., Heuvelink G.B.M., Lewis S.L., Phillips O.L., Asner G.P., Armston J., Asthon P., Banin, L., Bayol N., Berry N.J., Boeckx P., de Jong B.H.J., DeVries B., Girardin C., Kearsley E., Lindsell J., Lopez-Gonzalez G., Lucas R., Malhi Y., Morel A., Mitchard E.T.A., Nagy L., Qie L., Quinones M., Ryan C.M., Slik F., Sunderland T.C.H., Vaglio Laurin G., Valentini R., Verbeeck H., Wijaya A. & Willcock S., 2016. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biol.*, 22 (4) : 1406–1420.
- Baccini A., Goetz S.J., Walker W.S., Laporte N.T., Sun M., Sulla-Menashe D., Hackler J., Beck P.S.A., Dubayah R. & Friedl M.A., 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2 : 182–185.
- Badreldin N. & Sanchez-Azofeifa A., 2015. Estimating Forest Biomass Dynamics by Integrating Multi-Temporal Landsat Satellite Images with Ground and Airborne LiDAR Data in the Coal Valley Mine, Alberta, Canada. *Remote Sensing*, 7 : 2832-2849.
- Baker T. R., Phillips O.P., Malhi Y., Almeida S., Arroyo L., Di Fiore A., Killeen T.J., Laurance W.F., Lewis S.L., Lloyd J., Monteagudo A., Neill D.A., Patinô S., Pitman N.C.A., Silva N. & Martinez R.V., 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, 10 : 545-562.

- Basuki T.M., Van Laake P.E., Skidmore A.K. & Hussin, Y.A., 2009. Allometric equations for estimating the aboveground biomass in tropical lowland *Dipterocarp* forests. *Forest Ecology Management*, 257 : 1684–1694.
- Brown S. & Pearson T., 2005. *Exploration du potentiel de séquestration du carbone dans les forêts classées de la République de Guinée*. Winrock International., 39 p.
- Brown S., Gillespie A. & Lugo, A.E., 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Sciences*. 35 : 881-902.
- Burns S. A. & Reiger S., 2015. *Climatic response to globally increasing concentrations of greenhouse gases*. In: Djomo, A.N (Eds). *Climate Change: the Earth at the palm of our hands*. IFED Publishing, Kingston. pp. 12-21
- Canadell J.G., Raupach M.R. & Houghton R.A., 2009. Anthropogenic CO₂ emissions in Africa. *Biogeosci. Discuss.*, 6: 463–468.
- Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.-P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riéra B. & Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145: 87-99.
- Chave J., Muller-Landau H. C., Baker T. R., Easedale T. A., Ter Steege H. & Webb. C. O., 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological Applications*, 16: 2356–2367
- Chave J., Rejou-Mechain M., Burquez A., Chidumayo E. , Colgan S. M., Delitti B.C.W., Duque A., Eid T., Fearnside M.P., Goodman C.R., Matieu H., Martinez-Yrizar A., Mugasha A.W., Muller-Landau C.H., Mencuccini M., Nelson W.B., Ngomanda A., Nogueira M.E., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan M.C., Juan G., Saldarriaga G.J. & Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical. *Global Change Biol.*, doi: 10.1111/gcb.12629
- Chimi D. C., Zapfack L. & Djomo N. A. 2018. Diversity, structure and biomass (above and below) in a semi-deciduous moist forest of East Region of Cameroon. *Journal of Biodiversity and Environment Sciences*, 12(3): 60-72.
- Day M., Baldauf C., Rutishauser E. & Sunderland C. H.T., 2013. Relationships between tree species diversity and above-ground biomass in Central African rainforests: implications for REDD. *Environmental Conservation*, doi:10.1017/S0376892913000295.
- Degrott J., Klethi P-A., Mersch C., Thiercelin G., Thill J. & Winckel E., 2015. *Résolution sur la conférence de Paris sur le climat (COP 21)*. Ugent.Parlament.lu. Luxembourg, 7p.

- Desclée B., Mayaux P., Hansen M., Amani P.L., Sannier C., Mertens B., Hausler T., Siwe R.N., Poilvre H., Gond V., Rahn M., Haarpaintner J. et Lubamba K.J-P., 2013. Evolution du couvert forestier du niveau national au régional et moteur de changement. In : *Etat des forêts* 2013. Pp 21-46.
- Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C. & Wisniewski J., 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science* 263: 185–190.
- Djomo A.N., Ibrahima A., Saborowski J. & Gravenhorst, G., 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management*, 260 : 1873-1885.
- Djomo N. A., Knohl A. & Gravenhorst G., 2011. Estimations of total ecosystem carbon pools distribution and carbon biomass current annual increment of a moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 261 (8) : 1448–1459.
- Djomo A., 2015a. *Forsest Ecosystem : measurement and modelling of biomass and carbon*. IFED Publishing, Kingston , ON, Canada. 423 p.
- Djomo N.A., 2015b. A Structure Analysis for Ecological Management of Moist Tropical Forests. *International Journal of Forestry Research*. Article ID 161645, 12 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2015/161645>
- Djomo N.A., Picard N., Fayolle A., Henry M., Ngomanda A., Ploton P., McLellan J., Saborowski J., Adamou I. & Lejeune, P., 2016. Tree allometry for estimation of carbon stocks in African tropical forests. *Forestry*, 1–10, doi: 10.1093/forestry/cpw025.
- Djomo N.A. & Chimi D.C. 2017. Tree allometry for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: Case study with application to remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 391 : 184–193.
- Djomo N. A., Ngoukwa G., Zapfack L., Chimi D. C., 2017. Variation of wood density in tropical rainforest trees. *Journal of Forests*, 4(2): 16-28.
- Djuikouo K. M.N., Doucet J-L., Nguembou K.C., Simon L. Lewis L.S. & Sonke B., 2010. Diversity and aboveground biomass in three tropical forest types in the Dja Biosphere Reserve, Cameroon. *Afr. J. Ecol.*, 48 : 1053–1063.
- Dube T., Mutanga O., Shoko C., Samuel A. & Bangira T., 2016. Remote sensing of aboveground forest biomass: A review. *Trop. Ecol.* 57(2): 125-132.
- Duncanson L.I., Cook B.D., Hurtt G.C. & Dubayah, R.O., 2014. An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, 154: 378–386.

- Enes T.D. & Fonseca T.F., 2014. Biomass conversion and expansion factors are affected by thinning. *Forest Systems*, 23(3): 438-447.
- Fayolle A., Doucet J-L., Gillet J-F., Bourland N. & Lejeune P., 2013. Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *Forest Ecology and Management* 305 : 29–37
- Fearnside, P.M., 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 90 : 59–87.
- Fongzossie F.E., Tsabang N., Nkongmeneck B.A., Nguenpang G.M., Auxel P., Christiana E., Kamou E., Balouma J.M., Apolo P., Mathieu H., Valbuena M. & Valère M., 2008. Les peuplements du sanctuaire à gorilles de Mengamé au Sud Cameroun. *Tropical Conservation Sciences*, 1 (3): 204-221.
- Fuentes M.A., Llorens J., Gamarra-Diezma L.J., Gil-Ribes A.J. & Gil E., 2015. Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement. *Sensors*, 15, 3671-3687.
- Giri N., Kumar R., Rawat L. & Kumar P., 2014. Development of Biomass Expansion Factor (BEF) and Estimation of Carbon Pool in *Ailanthus excelsa* Roxb Plantation. *J. Chem. Eng. Process. Technol.*, 5 (6): doi: [10.4172/2157-7048.1000210](https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000210)
- Goodman R.C., Phillips, O.L. & Baker R.T., 2014. The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecol. Appl.*, 24(4): 680–698.
- Gould S.J., 1966. Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews*, 41(4): 587–638.
- Green C., Tobin B., Edward P.M.O. & Byrne F.K.A., 2004. Above- and belowground biomass measurements in an unthinned stand of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong) Carr.). *Eur. J. Forest Res.* 126: 179–188.
- Hacke U.G., Sperry W.T., Pockman S.D. & McCulloh. K.A. 2001. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. *Oecologia*, 126: 457–461
- Hairiah K., Dewi, S., Agus F., Velarde S., Ekadinata A., Rahayu S. & Van Noordwijk M., 2011. *Measuring Carbon Stocks Across Land Use Systems: A Manual*. Bogor, Indonesia. World Agroforestry Centre (ICRAF), SEA Regional Office. 154 p.
- Helmisaari H-S, Derome J., Nöjd P. & Kukkola M., 2007. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. *Tree Physiology*, 27 : 1493–1504.

- Henry M., Besnard A., Asante W.A., Eshun J., Adu-Bredu S., Valentini R., Bernoux M. & Saint-André, L. 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260: 1375–1388.
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R.J., Valentini, R., Bernoux, M. & Saint-André, L., 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45(3B): 477–569.
- Ibrahima A., Schmidt P., Ketner P. & Mohren G.J.M., 2002. *Phytomasse et cycle des nutriments dans la forêt tropicale dense humide du Sud Cameroun*. Tropenbos-Cameroon Documents 9. The Tropenbos Cameroon Programme, Cameroon. 100 p.
- Ilic J., Boland D., McDonald M., Downes G. & Blakemore P., 2000. *Wood Density Phase I: State of Knowledge, National Carbon Accounting System*. Australian Greenhouse Office, Commonwealth of Australia. Technical Report N°. 18, 218 p.
- Jagoret P., Bouambi E., Todem N. H., Battini J. L, & Nyassé, S. 2008. Analyse de la diversité des systèmes de pratiques en cacaoculture. Cas du Centre Cameroun. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12(4) : 367-377.
- Jiagho R.E., Zapfack L., Banoho Kabelong R.L.P., Demase T.M., Corbonnois J. & Tchama P., 2016. Diversité de la flore ligneuse à la périphérie du parc national de Waza (Cameroun). *Vertigo, La revue électronique en science de l'environnement* [en ligne], 16(1), URL :<http://vertigo.revues.org/17249>
- Jiofack T., Guedje N.M., Tchoundjeu Z., Fokunang C., Lejoly J. & Kemeuze, V., 2013. Agroforestry typology of some cocoa based agroforests in the Mbam and Inoubou division: The importance for local population livelihoods. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 5 (12): 378-386
- Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F., Dalponte M., van Ewijk K. Y., Forrester D. I., Haeni M., Higgins S. I., Holdaway R. J., Iida Y., Lorimer C., Marshall P. L., Momo S., Moncrieff G. R., Ploton P., Poorter L., Rahman K. A., Schlund M., Sonké B., Sterck F. J., Trugman A. T., Usoltsev V. A., Vanderwel M. C., Waldner P., Wedeux B. M. M., Wirth C., Wöll H., Woods M., Xiang W., Zimmermann N. E. & Coomes D. A., 2016, Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global Change Biol.* doi:10.1111/gcb.13388

- Kachamba J.D., Eid T. & Gobakken T., 2016. Above- and Belowground Biomass Models for Trees in the Miombo Woodlands of Malawi. *Forests* 7: 38, doi:[10.3390/f7020038](https://doi.org/10.3390/f7020038)
- Kindt R & Coe R. 2005. *Tree diversity analysis. A manual and software for common statistical methods for ecological and biodiversity studies*. Nairobi: World Agroforestry Centre (ICRAF). 207p.
- Kollmann F.F.P. & Cote, W.A.J. 1968. *Principles of wood science and technology solid wood, vol. 1*. Springer-Verlag, New York, USA, 592 p.
- Korhonen L., Korhonen K.T., Rautiainen M. & Stenberg, P., 2006. Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. *Silva Fennica*, 40(4): 577–588.
- Kumar L., Sinha P., Taylor S. & Alqurashi F.A., 2015. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. *J. Appl. Remote Sens.*, 9 : DOI: 10.1117/1.JRS.9.097696.
- Kurz W.A., Birdsey R.A., Mascorro V.S., Greenberg D., Dai Z., Olguín M. & Colditz R., 2016. *Modélisation et évaluation intégrées de la dynamique du carbone forestier en Amérique du Nord : Outils de suivi des émissions de gaz à effet de serre dans les forêts et de leur élimination, et de présentation de rapports et de projection connexes (rapport sommaire)*. Commission de coopération environnementale, Montréal, Canada. 24p.
- Kwak D.A., Lee W.K., Lee J.H., Biging G.S. & Gong, P. 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. *Journal of Forest Research*, 12(6): 425–434.
- Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M., Peters G.P., Ciais P., Friedlingstein P., Jones S.D., et al., 2015. Global Carbon Budget 2014. *Earth System Science Data*, 7(1) : 47–85.
- Letouzey R., 1985. *Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1: 500000*. Institut de la carte internationale de la végétation; Toulouse- France. Pp 63-142.
- Levy P.E, Hale S.E., & Nicoli B.C., 2004. Biomass expansion factors and root: shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry*, 77(5): 421-430.
- Lewis S., Sonke B., Sunderland T., Begne S.K., Gonzale L.G., Van der Heijden M.F.G., Phillips L.O., Affum-Baffoe K., Timothy R. Baker R.T., Banin L., Bastin J-F., Beeckman H., Boeckx P., Bogaert J., De Cannier C., Chezeaux E., Clark J.C., Collins M., Djangbletey G., Djuikouo K.M.N., Droissart V., Doucet J-L., Ewango N.E.C., Fauset S., Feldpausch R.T., Foli G.E., Gillet J.F., Hamilton C.A., Harris J.D., Hart

- B.T., De Haulleville T., Hladik A., Hufkens K., Huygens D., Jeanmart P., Jeffery J.K., Kearsley E., Leal E.M., Lloyd J., Lovett C.J., Makana J-R, Malhi Y., Marshall R.A., Lucas Ojo, Peh, S.-H.E., Pickavance G., Poulsen R.J., Reitsma M.J., Sheil D., Simo M., Steppe K., Taedoung E. H., Talbot J., Taplin R.D.J., Taylor D., Thomas C.S., Toirambe B., Verbeeck H., Vleminckx J., White T.J.L., Willcock S., Woell H. & Zemagho L., 2013. Aboveground biomass and structure of 260 African tropical forests. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 368: 20120295. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2012.0295>.
- Lewis L.S., Lopez G., Sonké B., Affum-B.K., Baker T.R., Ojo L.O., Phillips O.L., Reitsma J., White L., Comiskey J., Ewango C., Feldpausch T.R., Hamilton A.C., Gloor M., Hart T., Hladik A., Djuikouo K.M.N., Jon L., Lovett J., Makana J.-R., Malhi Y., Mbago F.M., Ndangalasi H.J., Peacock J., Peh K.S.-H., Sheil D., Sunderland T., Swaine M.D., Taplin, J., Taylor D., Sean C.T., Votere R. & Hannsjorg, W., 2009. Increasing carbon Storage in intact African tropical forests. *Nature*, 457: 1003–1006.
- Lindgren L.O., 1991. The accuracy of medical CAT-scan images for non-destructive density measurements in small volume elements within solid wood. *Wood Science and Technology*, 25 (6): 425-432.
- Locatelli B., 2005. *Mécanisme de Développement Propre : quelles opportunités pour le secteur forestier d'Afrique Centrale ? Formation « Mécanismes de financement durables »*. Présentation Libreville. Gabon, 77 p.
- Lu, X., Hu, Y., Lucker, P. & Trepte, C. 2016. Forest Canopy Height Estimation from Calipso Lidar Measurement. *EPJ Web of Conferences*, 119: 22005.
- Magalhães T.M., & Thomas Seifert T., 2015. Tree component biomass expansion factors and root-to-shoot ratio of Lebombo ironwood: measurement uncertainty. *Carbon Balance and Management*, 10(9): DOI [10.1186/s13021-015-0019-4](https://doi.org/10.1186/s13021-015-0019-4)
- Malinovski A.R., Nutto L., Wiese S.W. & Brunsmeier, M., 2016. Non-destructive analysis of the root system and tree growth parameters. *Revista Árvore, Viçosa-MG* 40(2): 289-295.
- Maréchal C., Cawoy V., Cocquy C., Dauby G., Dessein S., Hamilton D.I., Dupain J., Fischer E., Obang D.F., Groom Q., Henschel P., Jeffery K.J., Korte L., Lewis S.L., Lubunn S., Maisels F., Melletti M., Ngoufo R., Ntore S., Palla F., Scholte P., Sonké B., Stévar T., Stoffelen P., VAN den Broeck D., Walters G. & Williamson, E.A. 2013. *Conservation*

- et gestion de la biodiversité*. In : De Wasseige, C., Flynn, J., Louppe, D., Hiol, H.F., Mayaux, P. (Eds), *Etat des forêts 2013*. OFAC, Belgique, pp. 67-96.
- Marniesse S. & Filipiak E., 2003. *Lutte contre l'effet de serre : Enjeux & Débats*. MAGELLAN & Cie, Paris, France. 125 p.
- Massenet J-I., 2011. Chapitre II : hauteur des arbres. Lycée forestier–Château de Mesnières–76270 Mesnieres-En-Bray. 20 p.
- Mbolo A.M. M. M., Zekeng, J. C., Mala, W. A., Fobane, J. L., Chimi, D. C., Ngavunsia T., Nyako, M. C., Menyene E.F.L. & Tamandjong, V. 2016. The role of Cocoa agroforestry in conserving forest tree diversity in Central Region of Cameroon. *Agroforestry System*. 90: 577–590.
- McElhinny C., Gibbons P., Brack C. & Bausch J., 2005. Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement, *Forest Ecology and Management*, 218(1-3): 1–24.
- Megevand C., Mosnier A., Hourticq J., Sanders K., Doetinchem N., & Streck C., 2013. *Deforestation Trends in the Congo Basin: Reconciling Economic Growth and Forest Protection*. World Bank, Directions in Development, Washington. 180 p.
- Moby E.P., Morin S., Muller J. & Gavaud M. 1979. *Atlas De La République Unie du Cameroun*. Edition jeune Afrique. Paris-France, 72 p.
- Mokany K., Raison R.J. & Prokushkin A., 2006. Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*. 12 : 84-96.
- Molto Q., Rossi V. & Blanc L., 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods Ecol. Evol.*, 4(2): 175-183.
- Momo T.S. 2012. Equations allométriques adaptées aux grands arbres de la forêt tropicale humide du Cameroun. Msc thesis, Université de Dschang. Cameroun. 86 p.
- Moundounga M. Q. Ngomanda A., Obiang Engone N. L., Lebamba L., Gomat H., Mankou G.S., Loumeto J., Iponga Midoko D., Ditsouga K.F., Koumba Z. R., Botsika Henga K., Bobé, Lépengué N., Mbatchi B. & Picard N., 2014. How to improve allometric equations to estimate forest biomass stocks? Some hints from a central African forest. *Can. J. For. Res.*, 44 : 685-691.
- Mugasha W.A., Eid T., Bollandas O.M., Malimbwi R.E., Chamshama S.A.O., Zahabu E. & Katani, J.Z. 2013. Allometric models for prediction of above-and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 310 : 87-101.

- Nelson W.B., Mesquita R., Pereirab L.G.J., Silas arcia Aquino de Souza, S. G A., Batista T. G. & Couto, B. L., 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, 117 : 149-167.
- Ngomanda A., Obiang E.L.N., Lebamba J., Mavouroulou M.Q, Gomat H. , Mankou S.G., Loumeto J., Iponga M.D., Ditsouga K.F., Koumba Z.R., Bobé B.H.K., Okouyi M.C., Nyangadouma R., Lépengué N., Mbatchi B. & Picard, N., 2014. Site-specific versus pantropical allometric equations: Which option to estimate the biomass of a moist central African forest? *Forest Ecology and Management*, 312 : 1–9.
- Ngoukwa, G., 2016. *Evaluation de la Variation de la densité inter et intra spécifique au sein de l'UFA 10065 (Est-Cameroun)*. Msc thesis, University of Yaounde 1, Yaoundé, Cameroun. 71p.
- Nguenang G.M., Nkongmeneck B.A., Gillet J-F., Vermeulen C, Dupain J.& Doucet J-L., 2010. Etat actuel de la sécondarisation de la forêt en périphérie nord de la Réserve de biosphère du Dja (Sud-est Cameroun): influences des facteurs anthropiques passés et des éléphants. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4(5): 1766-1781.
- Nochur A. & Muller J., 2005. *The effects of rainfall and seasonality community composition*. Bio, 181 p.
- Nogueira E.M., Nelson B.W. & Fearnside P.M., 2005. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. *Forest Ecology and Management* 208: 261–286.
- Noiha N.V., Zapfack L., Ngueguim J.R. & Tabue M.R.B., 2015. Sequestered Standing Carbon Stock in Selective Exploited Timbers Grown in Tropical Forest: a Case Study from the National Park of Lobeke (Cameroon). *Journal of Botanical Sciences*, 4(2): 19-24
- Nowak B. & Romanchuk N. 2015. *Effects of climate change in the Amazon forest : Djomo, A.N (Eds). Climate Change: the Earth at the palm of our hands*. IFED Publishing, Kingston. Pp. 79-86
- Onana J.M., 2011. *The vascular Plant of Cameroon a taxonomic checklist with UICN assessments*. Flore du Cameroun Volume 39 "Occasional Volume". IRAD -National Herbarium of Cameroon, Yaoundé, 195 p.
- Panzou L., G.J., Doucet J-L., Loumeto J-J., Biwole A., Bauwens S. & Fayolle A., 2016. Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 20(4), 508-522.

- Petersson H., Holm S., Ståhl G., Alger D., Fridman J., Lehtonen A., Lundström A. & Mäkipää A., 2014. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management*, 270 : 78–84.
- Picard N., Saint-André L. & Henry M. 2012. *Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres: de la mesure de terrain à la prédiction*. CIRAD, FAO., Rome, Montpellier, 207 p.
- Picard N., Boyemba B. F. & Rossi V., 2015. Reducing the error in biomass estimates strongly depends on model selection. *Ann. For. Sci.*, 72(6): 811-823.
- Ploton P., Barbier N., Momo T.S., Réjou-Méchain M., Boyemba B.F., Chuyong G., Dauby G., Droissart V., Fayolle A., Goodman R.C., Henry M., Kamdem N.G., Katembo Mukirania, J., Kenfack D., Libalah M., Ngomanda A., Rossi V., Sonké B., Texiern N., Thomas D., Zebaze D., Couteron P., Berger U. & Pélissier R., 2016. Closing a gap in tropical forest biomass estimation: accounting for crown mass variation in pantropical allometries. *Biogeosciences*, 13: 1571–1585.
- Poudel P.K., Temesgen H. & Gray N.A., 2015., Evaluation of sampling strategies to estimate crown biomass. *Forest Ecosystems*, 2:1, DOI 10.1186/s40663-014-0025-0
- R Core Team, 2016. R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria., ISBN 3-900051-07-0 URL <http://www.R-project.org>.
- Rabier F., Temmerman M., Böhm T., Hartmann H., Daugberg Jensen P., Rathbauer J., Carrasco J. & Fernández M., 2006. Particle density determination of pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30: 954-963.
- Reyes G., Brown S., Chapman J., Lugo & Ariel E., 1992. *Wood densities of tropical tree species*. Gen. Tech. Rep. SO-88 New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 15pp.
- Rusu E., 2013. The Current Situation Of The Stock Of Carbon In Forest Ecosystems At Regional And Global. *Present Environment And Sustainable Development*, 7(1) : 88-101.
- Saatchi S.S., Harris N.L., Brown S., Lefsky M., Mitchard E., Salas W., Zutta B.R, Buermann W., Lewis S.L., Hagen S., Petrova S., White L., Silman M. & Morel, A., 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 : 9899–9904.

- Sanquetta C.R., Ana P.D., Corte A.P.D. & Da Silva F., 2011. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. *Carbon Balance and Management*, 6 (6): 8p
- Shendryk I., Broich M., Tulbure M.G. & Alexandrov S.V., 2016. Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest. *Remote Sens. Environ.*, 173: 69–83.
- Sillett S. C., Van Pelt R., Koch G. W., Ambrose A. R., Carroll A. L., Antoine M. E. & Mifsud B. M., 2010. Increasing wood production through old age in tall trees, *Forest Ecology and Management*, 259 : 976–994.
- Simpson W., & TenWolde A., 1999. *Physical properties and moisture relations of wood*. Chapter. 3. In: *Forest Products Laboratory*. Wood Handbook-wood as an engineering material. Gen. Tech. Re FPL-GTR-113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA. 463 p.
- Smith Iii, T. J. & Whelan, K. R. T., 2006. Development of allometric relations for three mangrove species in South Florida for use in the Greater Everglades Ecosystem restoration. *Wetland Ecology and Management*, 14: 409-419.
- Sonké B. 2004. *Forêts de la réserve du Dja (Cameroun). Etude floristique et structurale*. Meise, Jardin Botanique National de Belgique. 144 p.
- Svante A., 1896. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5(41) : 237-276.
- Tabue M. R. B., Zapfack L., Noiha N. V., Nyeck B., Meyan-Ya D. R. G., Ngoma L. R., Kabelong B. L-P. & Chimi D. C., 2016. Plant Diversity and Carbon Storage Assessment in an African Protected Forest: A Case of the Eastern Part of the Dja Wildlife Reserve in Cameroon. *Journal of Plant Sciences*, 4(5) : 95-101.
- Tobin B. & Nieuwenhuis M., 2007. Biomass expansion factors for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Ireland. *Eur. J. Forest Res.*, 126: 189–196.
- Trugilho P.F., Silva D.A., Frazão F.J.L. & Matos J.L.M., 1990. Comparação de métodos de determinação de densidade básica em Madeira. *Acta Amazonica*, 20: 307-319.
- Vahedi A.A., Mataji A., Babayi-Kafaki S., Eshaghi-Rad J., Hodjati S.M. & Djomo A., 2014., Allometric equations for predicting aboveground biomass of beech-hornbeam stands in the Hyrcanian forests of Iran. *Journal of Forest Sciences*, 60(6): 236–247.
- Via B.K., Fasina O. & Pan H., 2011. Assessment of pine biomass density through mid-infrared spectroscopy and multivariate modeling. *Bioresources*, 6: 807-822.

- Vieilledent G., Vaudry R., Andriamanohisoa S.F.D., Rakotonarivo O. S., Randrianasolo H.Z., Razafindrabe H.N., Rakotoarivony C.B., Ebeling J. & Rasamoelina, M., 2012. A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models. *Ecol. Appl.*, 22 : 572-583.
- Wang J., Zhang C., Xia F., Zhao X., Wu, L. & Gadow, K. V., 2011. Biomass structure and allometry of *Abies nephrolepis* (Maxim) in Northeast China. *Silva Fennica*, 45(2): 211–226.
- Wiemann M.C. & Williamson G.B., 1989. Radial gradients in the specific gravity of wood in some tropical and temperate trees. *Forest Sciences*, 35: 197–210.
- Xiao X., White P.E., Hooten M B. & Durham, L.S., 2011. On the use of log-transformation vs. nonlinear regression for analyzing biological power laws. *Ecology*, 92(10): 1887–1894.
- Xu Y., Zhang J., Scott B. F., Liang J., Ding P., Luo Y., Lu Z., Bao D. & Jiang, M., 2011. Improving allometry models to estimate the above- and belowground biomass of subtropical forest, China. *Ecosphere*, 6(12): 1-15.
- Yao W., Krzystek P. & Heurich, M., 2012. Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne fullwave form LiDAR data. *Remote Sens. Environ.*, 123 : 368–380.
- Zanne A.E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D.A., Ilic J., Jansen S. Lewis, S.L., Miller R.B. & Swenson N.G., Wiemann, M.C., and Chave J. 2009. *Global wood density database*. Dryad. Identifier: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.
- Zapfack L., Chimi D. C., Noiha N. V., Zekeng J. C., Meyan-ya D. G. R. & Tabue M. R. B., 2016. Correlation between associated trees, cocoa trees and carbon stocks potential in cocoa agroforests of southern Cameroon. *Sustainability in Environment*. 1(2) : 71-84.
- Zapfack L., Noiha N. V., Dziedjou K. P. J., Zemagho L., & Fomete, N. T. 2013. Deforestation and carbon stocks in the surroundings of Lobéké National Parc (Cameroon) in Congo Basin. *Environment and Natural Resources Research*, 3(2) : 78-86.
- Zianis D., 2008. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *For. Ecol. Manage.* 256 : 1400–1407.

ANNEXE

Annexe 1. Listes des espèces ligneuses identifiés jusqu'au niveau taxonomiques genre dans la zone d'étude.

Famille	Noms scientifiques	Noms communs/locaux
	<i>Antrocaryon micraster</i> A. Chev. &	Onzambili M

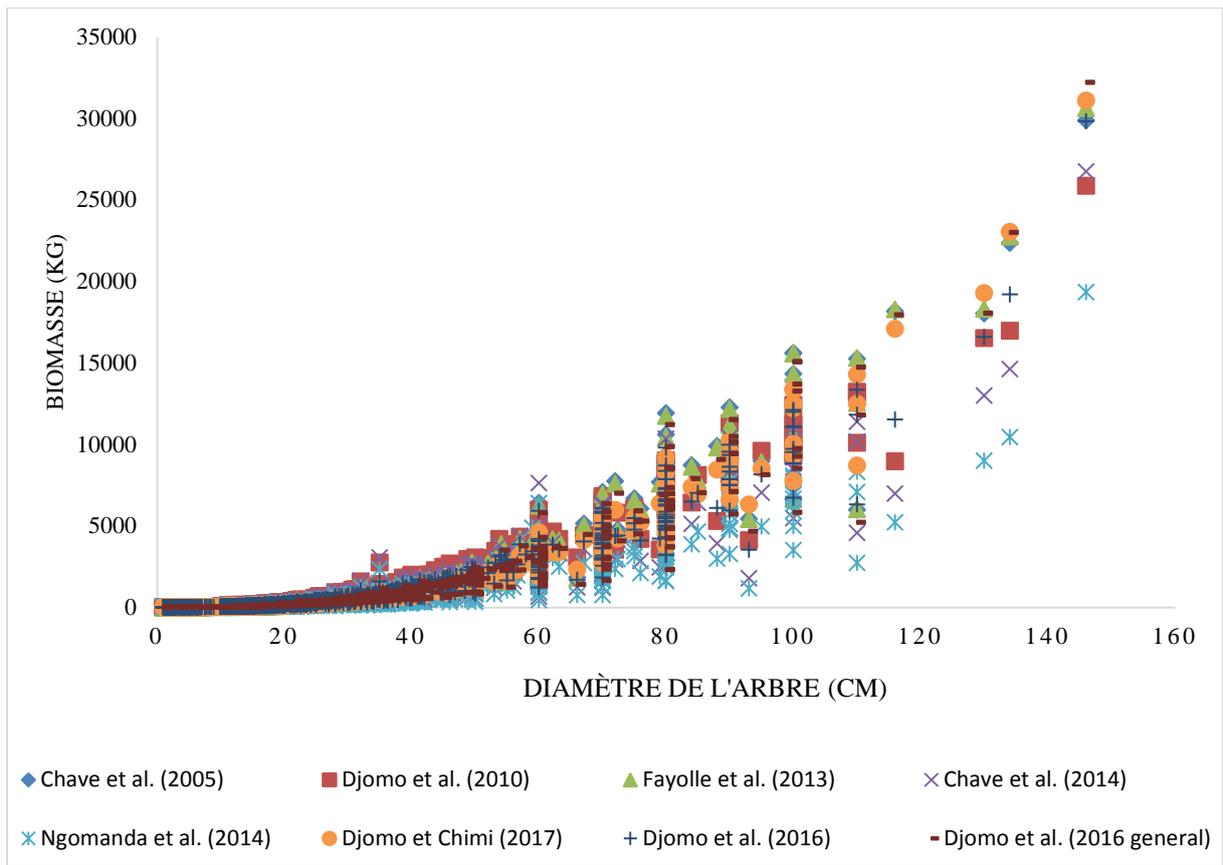
Anacardiaceae	Guillaum.	
	<i>Antrocaryon</i> sp.	
	<i>Lanea welwitschii</i> (Hiern) Engl.	Kumbi
	<i>Trichoschypha acuminata</i> Engl.	Engong
	<i>Trichoschypha</i> sp.	
Annonaceae	<i>Annona mucosa</i>	
	<i>Enantia chloranthia</i> Oliv.	Moambé jaune
	<i>Greenwayoderdron suaveolens</i> Eng. Diels	Otunga
	<i>Piptostigma</i> sp.	
Apocynaceae	<i>Alstonia boonei</i> De Wild.	Emien
	<i>Funtumia africana</i> (Preuss) Stapf	
	<i>Funtumia</i> sp.	
	<i>Picralima nitida</i> (Stapf) th. & H. Dur.	Ebam
	<i>Tabernaemontana crassa</i> Benth.	Etuia
Boraginaceae	<i>Cordia platythyrsa</i> Bak.	Cordia d'Afrique
Bombacaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (Linn.) Gaertn.	Fromager
Burseraceae	<i>Canarium schweinfurthii</i> Engl.	Aielé
	<i>Dacryodes buettneri</i> (Engl.) Lam	Ozigo
	<i>Dacryodes</i> sp.	
Cecropiaceae	<i>Musanga cecropoides</i> R. Br.	Parassolier
Combretaceae	<i>Terminalia superba</i> Engl. & Diels	fraké
Euphorbiaceae	<i>Alchornea laxiflora</i> (Benth.) Pax & K.Hoffm.	
	<i>Hevea</i> spp.	
	<i>Maccaranga about</i>	Amvut
	<i>Mallotus oppositifolius</i> (Geisel.) Mull. Arg.	Ofes
	<i>Microdesmis puberula</i> Hook. F. ex Planch.	Eveuskulu
	<i>Ricinodendron heudelotti</i> (Baill.) Pierre ex Pax	Ezezang
	<i>Uapaca guineensis</i> (Hutch.) Pax & K. Hoffm.	Rikio
<i>Uapaca heudelotii</i> Baill.	Rikio	
Fabaceae	<i>Albizia ferruginea</i> (Guill. & Perr.) Benth.	Sene
	<i>Albizia glaberrima</i> (Schum. & Thonn.) Benth.	Ebarakol
	<i>Albizia</i> sp.	
	<i>Amphimas pterocarpoides</i> Harms.	Lati P

	<i>Erythroxylum ivorensis</i> A. Chev.	Tali
	<i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> (Verm.) Harms	Tola
	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (Hook. F.) Brenan	Dabema
	<i>Plagiosiphon multijugus</i> (Harms) J. Léonard	Ekop
	<i>Pterocarpus soyauxii</i> Taub.	padouk
	<i>Swartzia fistuloides</i> Harms	Pao Rosa
Hypericaceae	<i>Garcinia punctata</i> Oliv.	Mekoa
Irvingiaceae	<i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre & Engl.	Eveuss G
	<i>Irvingia gabonensis</i> (Aubry-Lec. & ex O'Rorke) Baill.	
	<i>Irvingia</i> sp.	
Lecythidaceae	<i>Petersianthus macrocarpus</i> (P. Beauv.) Liben	Abalé/Essia
Loganiaceae	<i>Anthocleista sweinfurthii</i> Gilg	Ayinda
	<i>Strychnos barteri</i>	
Malvaceae	<i>Cola acuminata</i> (P. Beauv.) Schott & Endl.	Cola
	<i>Cola cordifolia</i> (Cav.) R. Br.	Cola
	<i>Cola</i> sp.	Cola
	<i>Eribloma oblongum</i> (Mast.) Pierre ex R. Germ.	Eyong
	<i>Mansonia altissima</i> (A. Chev.) A. chev	Bété
	<i>Octolobus spectabilis</i> Welw.	
	<i>Pterygota macrocarpa</i> K. Schum.	Efok Ayous
	<i>Pterygota</i> sp.	
	<i>Sterculia rhinopetala</i> K. Schum.	
	<i>Sterculia tragacantha</i> Lindl.	Efok afum
	<i>Triplochiton scleroxylon</i> K. Schum.	Ayous
Meliaceae	<i>Carapa</i> sp.	
	<i>Entandophragma angolense</i> (Welw.) C. DC.	Tiama blanco
	<i>Entandophragma candollei</i> Harms	Kosipo
	<i>Entandophragma cylindricum</i> (Sprague) Sprague	Sapelli
	<i>Entandophragma utile</i> (Dawe & Sprague) Sprague	Sipo
	<i>Guarea cedrata</i> (A. Chev.) Pellegr.	Bosse C
	<i>Guarea thompsonii</i> Sprague &	Bosse T

	Hutch.	
	<i>Guarea</i> sp.	Bosse
	<i>Lovoa trichilioides</i> Harms	Dibetou/bibolo
	<i>Trichilia monodelpha</i> Oliv.	Ekem
	<i>Trichilia rubescens</i> Oliv.	Ekem
Moraceae	<i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C. C. Berg	Iroko
	<i>Scyphocyse manniana</i> Baill.	
	<i>Trilepisium madagascariensis</i> DC.	Osonzo
Myristicaceae	<i>Pycnanthus angolensis</i> (Welw.) Warb	Ilomba
	<i>Staudtii</i> sp.	
	<i>Staudtii sptipitata</i> Warb.	Niové
Myrsinaceae	<i>Ardisia letouzeyi</i> Taton	
	<i>Ardisia</i> sp.	
Ochnaceae	<i>Rhodophyllum arnoldianum</i>	
Olacaceae	<i>Ongokea gore</i> (Hua) Pierre	Anguek
	<i>Aulacocalyx caudata</i>	
Rubiaceae	<i>Nauclea diderrichii</i> (De Wild. & Th. Dur.) Merrill	Bilinga
	<i>Nauclea</i> sp.	
	<i>Pauridiantha canthiiflora</i> Hook	
	<i>Pauridiantha</i> sp.	
Rutaceae	<i>Zanthoxylum heltzii</i> (Aubr. & Pellegr.) Waterman	Olon
	<i>Zanthoxylum</i> sp.	Bongo
Sapindaceae	<i>Lecaniodiscus cupanioides</i> Planch. Ex Benth.	
Sapotaceae	<i>Aningeria robusta</i> (A. Chev.) Aubr. & Pellegr	Aningré R
	<i>Aningeria altissima</i> (A. Chev.) Aubr. & Pellegr	Aningré A
	<i>Baillonella toxisperma</i> Pierre	Moabi
	<i>Gambeya africana</i> (Bak.) Pierre	Longhi
	<i>Gambeya</i> sp.	Longhi
Tiliaceae	<i>Duboscia macrocarpa</i> Bocq.	Akak
	<i>Ghphaea brevis</i> (Spreng.) Monachino	
Ulmaceae	<i>Celtis adolphi-frederichii</i> Engl.	Diana A
	<i>Celtis tessmannii</i> Rendle	Diana T
	<i>Celtis zenkeri</i> Engl.	Diana Z
Violaceae	<i>Rinorea dentata</i> (P. Beauv.) kuntze	Ové
	<i>Rinorea heudelotii</i> A. Chev. Ex	Fromager

	hutch & Dalz	
	<i>Rinorea</i> sp.	

Annexe 2. Variation de la biomasse estimée en fonction des équations existantes utilisées



Annexe 3. Matrice de corrélation de Pearson (R) entre la richesse spécifique, les paramètres structuraux et la biomasse forestière des arbres. N/ha= Nombre de tiges à l'hectare.

	Biomasse (t/ha)	Densité du bois	Diamètre moyen (cm)	Richesse spécifique	N/ha	Surface terrière (m ² /ha)
Biomasse (t/ha)	1,000000	0,070035				
Densité du bois	0,070035	1,000000				
Diamètre moyen (cm)	0,420577	0,807562	1,000000			
Richesse spécifique	0,168305	0,693834	0,91727	1,000000		
N/ha	-0,070680	-0,838451	-0,93188	-0,93343	1,000000	
Surface terrière (m ² /ha)	0,914062	-0,259933	0,15541	0,018850	0,194814	1,000000

Annexe 4. Modèles d'appréciation de l'influence de la diversité floristique et des paramètres structuraux sur la biomasse forestière des arbres. β_0 et β_1 = coefficients du modèle ; RSE=erreur standard résiduelle ; R² = carré multiple du coefficient de corrélation de Pearson, AIC : Critère d'Information d'Akaike.

Paramètres d'influence de la biomasse épigée (t/ha)	Paramètres statistiques calculés des modèles						
	β_0	β_1	RSE	R ²	AIC	F-statistic	p-value
Densité du bois	266,80	172,00	63,92	0,005	59,21	0,015	p=0,911 ^{ns}
Diamètre moyen (cm)	180,11	8,73	58,14	0,177	58,26	0,015	P=0,481 ^{ns}
Nombre de tiges (N/ha)	377,06	-0,05	63,92	0,005	59,21	0,015	p=0,910 ^{ns}
Richesse spécifique	304,01	0,84	63,17	0,283	59,09	0,087	p=0,787 ^{ns}
Surface terrière (m ² /ha)	-169,06	14,25	25,99	0,836	50,21	15,24	p = 0,029*

Annexe 5. Principes méthodologiques de « Queen's Facility for Isotope Research » pour la détermination des teneurs en carbone des 80 échantillons



Queen's Facility for Isotope Research



Queen's Facility for Isotope Research
Department of Geological Sciences
Miller Hall, Queen's University
Kingston, Ontario, Canada K7L 3N6
Tel. (613) 533-2183
Fax. (613) 533-6592

June 8th 2016

Dear Cedric,

Please find below the results from your WOs 20052016-1 and 24052016-1 for isotopic analyses of $\delta^{13}\text{C}$. QFIR protocols ensure both QA and QC reported herein for on-line results by generating 10% analyses each of the following: 1) certified reference materials and secondary standards 2) random duplication of unknown samples and 3) blanks. The off-line results are ensured by generating 20% standard analyses. This assurance and control program provides the routine monitoring of quality of both the measurements and the instrumentation.

Please note that all results are calibrated to certified reference materials, reported in standard permil notation (‰) and relative to the following international standards below:

<i>Isotope</i>	<i>Reference Material</i>
$\delta^{13}\text{C}$ relative to	VPDB

Precision, in permil notation (‰) is based upon duplicate sample analyses. Accuracy reported below, in permil notation (‰) is based upon primary or secondary standard analyses as follows:

<i>Isotope</i>	<i>Accuracy (std. dev.)</i>
$\delta^{13}\text{C}$	0.1‰

Prof. Kurt Kyser, Director QFIR

Client Name: Cedric / Adrien (Neal Scott)

WO#: 20052016-1 & 24052016-1

No. of Samples: n=80

Sample ID	%C	$\delta^{13}C$ ‰ vs. VPDB
21_AY_H	50.5	-26.3
6_TALI_M	34.4	-27.3
3_AY_H	55.2	-25.9
9_AY_M	50.9	-28.3
4_AY_H	42.0	-26.1
26_AY_H	43.7	-28.2
23_AY_H	36.8	-26.9
21_AY_M	43.8	-26.1
28_TALI_H	44.6	-27.4
5_AY_H	37.9	-27.6
28_TALI_M	39.3	-26.8
55_EYONG_H	43.6	-27.9
16_AY_H	41.5	-28.0
22_AY_H	41.8	-28.0
1_TALI_M	43.7	-26.4
22_AY_M	41.9	-27.9
24_AY_M	42.2	-28.0
27_AY_M	40.9	-27.4
53_DIANA_M	43.5	-28.4
23_AY_M	43.2	-26.9
30_AY_M	42.9	-27.4
53_DIANA_H	35.5	-27.7
1_TALI_H	41.5	-28.1
25_AY_H	43.5	-27.9
16_AY_M	44.2	-27.2
19_AY_H	41.2	-27.7
55_EYONG_M	41.4	-28.8
9_AY_H	45.9	-28.3
17_AY_H	48.6	-26.8
6_TALI_M	51.8	-27.9
16_AY_M	51.1	-28.1
5_AY_M	48.8	-26.7
27_AY_H	38.7	-27.3
3_AY_M	37.8	-26.8
19_AY_M	51.6	-27.6
30_AY_H	53.1	-27.3
18_AY_M	51.4	-27.2
24_AY_H	49.9	-28.3
17_AY_M	41.0	-27.5
25_AY_M	40.5	-27.3

18 AY H	29.3	-26.6
53 DIANA H3	50.7	-29.3
55 EYONG M3	52.2	-28.7
30 AY H3	46.9	-26.5
30 AY M1	51.8	-28.0
28 TALI H3	51.0	-27.5
30 AY M3	51.9	-26.3
53 DIANA H1	50.6	-28.3
6 TALI H3	43.6	-27.8
23 AY M1	52.6	-28.6
16 AY H1	47.9	-28.1
26 AY H1	48.5	-27.4
28 TALI M3	53.2	-27.3
24 AY H3	54.1	-27.4
53 DIANA M3	45.7	-27.6
6 TALI H1	48.5	-27.9
21 AY M1	52.7	-27.7
16 AY H3	47.5	-28.1
24 AY H3	43.2	-27.0
23 AY H1	45.4	-28.4
28 TALI M1	47.3	-29.3
26 AY M1	49.4	-27.8
30 AY H1	47.0	-27.4
21 AY H1	45.0	-27.6
55 EYONG M1	48.9	-29.0
6 TALI M1	49.2	-28.0
26 AY M3	75.8	-27.8
55 EYONG H3	38.0	-28.2
23 AY H3	48.5	-27.1
24 AY M3	37.3	-27.3
24 AY H1	37.0	-28.2
53 DIANA M1	33.2	-28.0
21 AY H3	45.2	-25.9
21 AY M3	25.0	-26.7
16 AY M3	46.2	-26.3
6 TALI M3	46.1	-27.7
55 EYONG H1	42.2	-27.6
28 TALI H1	51.4	-29.9
23 AY M3	46.1	-27.0
24 AY M1	48.4	-28.6

Methodology:

Carbon: Samples were weighed into tin capsules and the carbon isotopic composition was measured using a Costech ECS 4010 Elemental Analyzer coupled to a Thermo-Finnigan Delta^{Plus} XP Continuous-Flow Isotope Ratio Mass Spectrometer (CF-IRMS).

$\delta^{13}\text{C}$ values are reported using the delta (δ) notation in units of permil (‰) relative to Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) international standard, with a precision of 0.2‰.