UCL
Université catholique de Louvain

Faculté des Bioingénieurs

Analyse rétrospective des impacts de différentes méthodes sylvicoles sur les performances de *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen (Yangambi-RDC)

Présenté par Brice Yannick Djiofack

Promoteur : Prof. Quentin Ponette (UCL/ELI/ELIE)
Co-promoteur : Dr. Ir. Nils Bourland (MRAC/CIFOR/R&SD)

Lecteurs : Prof. Charles De Cannière (ULB)
Dr. Ir. Benoît Cassart (UCL/ELI/ELIE)
M. Benjamin Toirambe (MRAC)

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur :
Gestion des forêts et des espaces naturels

AGRO LOUVAIN
BIOINGÉNIEURS

Année académique 2017-2018

Dédicace

À mes grands-parents

Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu au Prof. Quentin PONETTE, Promoteur de ce mémoire de fin d'études, pour m'avoir accordé sa confiance, soutenu et encadré tout au long de ce travail. Merci pour ce risque qu'il a pris en me laissant aller à l'étranger pour ce travail à une période où le climat politique n'était pas favorable, également pour ses enseignements et pour ses multiples mots d'encouragement qui m'ont permis de tenir le coup pendant ces années d'études.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr. Nils BOURLAND, Co-promoteur de ce mémoire, pour m'avoir accepté sans condition et offert l'opportunité de réaliser ce travail, pour m'avoir écouté et épaulé dans la recherche de financements pour mon voyage en RDC, pour ses conseils avant et pendant mon séjour en RDC, pour avoir été à mes côtés à Yangambi où il a guidé mes premiers pas sur le terrain, n'hésitant pas un temps soit peu à adapter ses déplacements à mes activités sur le terrain et pour ces facilitations multiformes.

Un tout grand merci à M. Benjamin TOIRAMBE qui a bien voulu malgré toutes ses occupations en tant Secrétaire Général au Ministère de l'Environnement et Développement Durable (RDC) consacrer une semaine pour m'introduire à Yamgambi et m'accompagner sur le terrain, pour ces multiples rencontres assorties d'enrichissants conseils à Kinshasa. Merci encore pour toute votre contribution et le soutien que vous m'avez apporté.

Merci au Dr. Benoît CASSART pour avoir été disponible a chaque fois que je le sollicitais, pour son encadrement et ses remarques qui ont certainement contribué à l'amélioration de la qualité de ce travail.

Ce mémoire de fin d'études a été réalisé en collaboration avec le laboratoire de biologie du bois du Musée Royal d'Afrique Centrale de Tervuren (Dr. Hans BEECHMAN), dans le cadre du projet FORETS (Formation, Recherche, Environnement dans la Tshopo). Projet financé par l'Union Européenne et mis en œuvre par le *Center for International Forestry Research* (Dr. Robert NASI, Dr. Paolo CERUTTI) et la société *Ressources & Synergies Development* (Dr. Quentin DUCENNE). Un vibrant merci à ces institutions pour avoir cru en ce projet et l'avoir supporté financièrement, support sans lequel je ne serais allé jusqu'à la fin de cette aventure. Un merci particulier au Dr. Quentin DUCENNE, Directeur du Projet FORETS. Nous avons également bénéficié d'un appui financier et scientifique du projet GeForCo dans lequel ce travail s'intègre à la base. Un tout grand merci à tout le reste de l'équipe R&SD et CIFOR (tout particulièrement à Gloria ASSIMBO, Barbara AGNETA, Juguel LIMBA, Bijou NGALULA et Raoul MBALI) pour avoir fourni et géré efficacement la logistique avant et pendant mon séjour en RDC. Un merci également à Vincent BAILLY (R&SD *Technology*) pour m'avoir aidé pour tout ce qui concerne le SIG dans ce travail.

Un grand merci également à toutes ces personnes sympathiques et à ces chercheurs que j'ai eu la chance de rencontrer à Yangambi et qui n'ont cessé de m'encourager (un merci particulier au Dr. Charles DOUMENGE, au Dr. Christian AMANI, au Dr. Denis SONWA, au Dr. Silvia FERARRI, à M. Frans ARIJIS et à M. Jeremy Van LOON). Merci aussi au Prof. Jean Pierre MATE MWERU pour ses précieux conseils et au Dr. Jerôme EBUY pour ces multiples échanges à Kisangani.

Merci à l'Administration des relations internationales (ADRI) et au service d'aide aux étudiants de l'Université catholique de Louvain pour m'avoir octroyé une bourse de Stage dans le cadre du programme FAME/Mercator pour ce travail.

Merci aussi à tout ce personnel chaleureux de la Bibliothèque des Sciences et Technologies de l'Université catholique de Louvain, plus particulièrement à Madame Ruth KALF qui m'a assisté dans la recherche documentaire.

Je tiens aussi à remercier grandement tous ces techniciens que je ne saurais tous nommer ici (Kibinda, Essinga, Muzinga,...) qui m'ont accompagné quotidiennement dans la forêt ; sous le soleil ardent comme sous les pluies diluviennes, ils ont été fidèles, merci aussi parce que j'ai beaucoup appris à vos côtés.

Merci à toutes ces personnes de l'INERA qui m'ont bien accueilli et accepté parmi eux. A toute la grande famille de la Paroisse notre Dame de l'Assomption de Yangambi je leur suis infiniment reconnaissant pour leur hospitalité. Aux Abbés Christophe, Joseph, Maurice, Marcelin et maman Christine, trouvez ici toute ma gratitude. Abbé Joseph merci pour votre rire et pour ces histoires qui ont agrémenté mon séjour à la Paroisse.

A tous mes proches qui ont souffert d'inquiétudes lorsque je suis resté longtemps sans donner de mes nouvelles durant mon séjour à Yangambi, que ce travail soit pour vous un réconfort (je pense particulièrement à ma famille qui par ailleurs me soutient malgré les Kilomètres qui nous séparent depuis plusieurs années).

A M. Raymond MEZAZEM, M. Michel FOLEMU KOUENEZI, M. Hervé TENNE SIMANOU et Madame Elodie Laure NANKENG il est temps pour moi de leur faire part de toute ma gratitude.

Merci à Moise GEUTSA, Manuela MEKOUDJOU, Stéphane BABA, Preud'homme EZOUN, Dialo SISI pour tout le réconfort et l'amitié qu'ils m'ont offerts tout au long de ce travail. Un merci particulier à Eric ASONGANYI pour m'avoir initié à l'utilisation de plusieurs outils d'analyses statistiques.

Certainement j'ai omis beaucoup d'autres personnes merveilleuses qui nécessitaient d'être remerciées. Qu'ils acceptent ma profonde gratitude.

Résumé

Le présent travail réalisé entre février et mai 2018 à Yangambi (province de la Tshopo-RDC) emboîte le pas aux recherches en cours depuis quelques décennies en Afrique Centrale visant à améliorer les connaissances scientifiques sur l'écologie et la sylviculture de *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen, espèce tropicale à haute valeur commerciale. Cette espèce autrefois surexploitée souffre d'importants problèmes de régénération naturelle. Son aire de distribution naturelle s'étendant jadis du Ghana à la RDC est aujourd'hui disjointe. Considérée comme en « danger », elle est reprise sur la liste rouge de l'IUCN et inscrite depuis le 11 juin 1992 en Annexe II de la CITES. L'objectif global du travail visait à rassembler des informations scientifiques fiables sur les essais sylvicoles qui furent appliqués à cette espèces à Yangambi et sur ses conditions de croissance, afin de proposer des recommandations capables de promouvoir une exploitation durable et un traitement sylvicole répondant à ses exigences écologiques.

A cet effet, des recherches documentaires sur l'historique des activités sylvicoles concernant *P. elata* à Yangambi ont été réalisées dans différentes bibliothèques et centres de documentation en Belgique et à Yangambi. Celles-ci ont permis de décrire quelques-unes des méthodes sylvicoles testées par l'INEAC vers la fin des années 1940 et à l'origine de l'abondante régénération naturelle observable à ce jour dans les blocs d'aménagement de Yangambi. Ces essais sylvicoles consistaient essentiellement en des ouvertures du couvert forestier à des intensités variables autour des arbres semenciers.

Quelques paramètres dendrométriques ont été estimés. Dans une première étape, un inventaire systématique couplé aux mesures du dbh de toutes les tiges de *P. elata* a été effectué dans les blocs d'aménagement sur une surface d'environ 136,2 ha. Il ressort de cet inventaire, une densité de 6,4 tiges de *P. elata*/ha et une surface terrière totale de 0,9 m^2/ha. En comparant ces données à celles issues d'un inventaire de même type dans la forêt non-aménagée datant de septembre 2016, d'importantes différences de structure ont été mises en évidence. *P. elata* présente une structure de populations en forme de courbe en cloche en forêt non-aménagée qui contraste avec une structure en forme de « L » dans les blocs d'aménagement. Dans une seconde étape, l'analyse a porté sur la caractérisation de la dynamique forestière. Un taux de mortalité annualisé de 0,98 % a été enregistré. Un accroissement moyen annuel périodique de 0,24 ± 0,01 cm/an a été enregistré dans le dispositif d'inventaire systématique des blocs d'aménagement, contre 0,44 ± 0,06 et 0,44 ± 0,04 dans les circuits de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée et non-aménagée respectivement. Une variation importante des accroissements d'une classe de diamètre à l'autre a été notée. Chaque circuit consiste en une dizaine d'individus par classes de diamètre ([10-20[, [20-30[... ≥100 cm), dont le voisinage a été caractérisé à l'aide de placettes circulaires installées autour de 50 arbres-cibles échantillonnés dans chaque circuit.

Les données des placettes circulaires ont permis de modéliser la croissance de *P. elata* en intégrant le diamètre et des paramètres de la structure du peuplement pour exprimer l'intensité de la compétition. Le modèle log-normal avec le diamètre comme seule variable explicative de la variabilité résiduelle de l'accroissement s'est avéré plus performant dans ce cas que dans ceux intégrant les indices de compétition. Un autre modèle plus général intégrant le diamètre et un indice de compétition relatif à l'accès à la lumière a été ajusté aux données du dispositif d'inventaire systématique des blocs d'aménagement. Ce dernier permet de montrer l'influence significative de l'exposition de la couronne à la lumière sur la croissance de *P. elata*. L'allure générale de la courbe de croissance dans tous les cas montre une tendance unimodale.

Mots clés : Afromosia – Yangambi – Blocs d'aménagement – Sylviculture – Forêt tropicale humide d'Afrique Centrale - République Démocratique du Congo

Abstract

The present work done between February and May 2018 in Yangambi (Tshopo province-DRC) fits together the research that has been underway for some decades in Central Africa to improve scientific knowledge on the ecology and silviculture of *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen, a tropical species with high commercial value. This once-overexploited species suffers from significant natural regeneration problems. Its natural range extending from Ghana to the DRC is now disjointed. It is now considered as threatened and listed on the IUCN red list and CITES Appendix II since 11 June 1992. The work aimed at collecting reliable scientific information on the silvicultural trials that were applied to this species in Yangambi and its growing conditions, in order to propose recommendations able to promote a sustainable exploitation and a silvicultural treatment meeting its ecological requirements.

For this purpose, documentary research on the history of silvicultural activities concerning *P. elata* in Yangambi were carried out in different libraries and documentation centers in Belgium and Yangambi. These have allowed to describe some of the silvicultural methods tested by INEAC in the late 1940s and at the origin of the abundant natural regeneration observable to this day in the Yangambi management blocks. These silvicultural trials consisted mainly of forest cover openings at varying intensities around seed trees.

Some dendrometric parameters were estimated. For the first step, a systematic inventory coupled to dbh measurements of all *P. elata* stems was performed in the management blocks on an area of about 136.2 ha. This inventory shows a stem density of 6.4/ha and a total basal area of 0.9 m^2/ha. When comparing these inventory data with those inventory of the same type in the unmanaged forest dating from September 2016, important differences on population structure were highlighted. *P. elata* presents a population structure in bell curve shape in unmanaged forest that contrasts with an « L-shaped » structure in the managment blocks. For the second step, the analysis focused on the characterization of the forest dynamics. An annualized mortality rate of 0.98 % was recorded. A mean annual diameter increments of 0.24 ± 0.01 cm /yr was recorded in the systematic inventory device of the management blocks, against 0.44 ± 0.06 and 0.44 ± 0.04 in the monitoring circuits of the forest dynamics in managed and unmanaged forests respectively. A significant variation of increases from one diameter class to another were noted. Each circuit consists of ten individuals by diameter classes ([10-20[, [20-30[... ≥100 cm), so the neighborhood was characterized using circular plots installed around 50 target trees sampled in each circuit.

Circular plot data were used to model the growth of *P. elata* by integrating the diameter and parameters of the stand structure to express the intensity of the competition. The log-normal model with diameter as the unique explanatory variable for the residual variability of the diameter growth proved more efficient in this case than those integrating the competition indexes. Another more general model integrating diameter and a competition index relating to the trees access to the light was adjusted to the data of the systematic inventory device of the management blocks. This shows the significant influence of the exposure of the crown to light on the growth of P. elata. The general trend of the growth curve in all cases shows a unimodal trend.

Key words : Afromosia – Yangambi – Management blocs – Silviculture – Tropical moist forest of Central Africa- Democratic Republic of Congo

Table des matières

Dédicace . . . ii
Remerciements . . . iv
Résumé . . . v
Abstract . . . vi
Table des matières . . . ix
Liste des abréviations . . . ix

1 Introduction générale **1**
1.1 Introduction . . . 1
1.2 Problématique de l'étude . . . 1
1.3 Objectifs et hypothèses de recherche . . . 2
1.3.1 Objectif général . . . 2
1.3.2 Objectifs spécifiques . . . 2
1.3.3 Hypothèses de recherche . . . 3
1.4 Articulation du mémoire . . . 3
1.5 Dynamique forestière et perturbations en forêt tropicale africaine . . . 3
1.5.1 Agriculture itinérante sur brûlis . . . 3
1.5.2 Exploitation forestière . . . 4
1.5.3 Déforestation . . . 4
1.5.4 Régénération naturelle des essences forestières tropicales . . . 5
1.6 Description du modèle d'étude . . . 6
1.6.1 Brève description de l'espèce . . . 6
1.6.2 Aire naturelle de distribution . . . 7
1.6.3 Tempérament . . . 8
1.6.4 Phénologie et dispersion de *P. elata* . . . 10
1.6.5 Aménagement des populations naturelles de *P. elata* . . . 11
1.6.6 Régénération naturelle de *P. elata* . . . 11
1.6.7 État actuel des connaissances sur la sylviculture et la croissance de *P. elata* . . . 12
1.6.8 Caractéristiques et commercialisation du bois de *P. elata* . . . 14
1.7 INEAC de Yangambi : Quel héritage ? . . . 14

2 Matériel et Méthodes **16**
2.1 Zone d'étude et sa localisation . . . 16
2.2 Milieu physique . . . 17
2.2.1 Caractéristiques du climat . . . 17
2.2.2 Relief et hydrographie . . . 18

2.2.3 Géologie et sols . . . 18
2.3 Milieu biologique . . . 18
2.3.1 Typologie des formations végétales . . . 18
2.4 Méthodologie de la recherche documentaire . . . 21
2.5 Méthode d'échantillonnage . . . 23
2.5.1 Présentation des dispositifs de collecte des données . . . 23
2.5.2 Installation des placettes circulaires . . . 26
2.6 Mesure des arbres et de leur environnement . . . 28
2.6.1 Mesure du DBH des arbres . . . 28
2.6.2 Statut social des arbres dans la canopée forestière . . . 28
2.6.3 Code de Dawkins et de Van Daalen . . . 29
2.7 Paramètres de la dynamique du peuplement . . . 30
2.7.1 Accroissement en diamètre . . . 30
2.7.2 Mortalité naturelle annualisée . . . 30
2.8 Structure du peuplement . . . 30
2.8.1 Structure diamétrique . . . 30
2.8.2 Densité et surface terrière . . . 31
2.8.3 Dominance, Abondance et Fréquence relative des espèces . . . 31
2.9 Analyses statistiques et modélisation . . . 31
2.9.1 Tests statistiques . . . 31
2.9.2 Modèle de croissance . . . 32
2.9.3 Indices de compétition . . . 34

3 Résultats **36**
3.1 Eléments historiques des traitements sylvicoles appliqués à *P. elata* . . . 36
3.1.1 Dégagement en bande . . . 37
3.1.2 Dégagements circulaires autour du semencier . . . 37
3.1.3 Traitement par groupes de régénération naturelle . . . 37
3.2 Cartographie historique des travaux sylvicoles dans les blocs d'aménagement . . . 39
3.3 Caractéristique structurale des milieux d'étude . . . 41
3.3.1 Structure des populations du modèle d'étude . . . 41
3.3.2 Espèces accompagnatrices du modèle d'étude en forêt aménagée et non-aménagée . . . 42
3.4 Caractérisation de l'échantillon : Dispositif en layon des blocs d'aménagement . . . 44
3.4.1 Distribution spatiale des arbres échantillonnés . . . 44
3.4.2 Densité et surface terrière . . . 44
3.4.3 Répartition des tiges de *P. elata* par classes de diamètre . . . 45
3.5 Paramètres de la dynamique forestière . . . 45
3.5.1 Accroissement moyen annuel périodique chez *P. elata* . . . 45
3.5.2 Mortalité naturelle annualisée . . . 51
3.6 Modélisation de la croissance diamétrique de *P. elata* . . . 52
3.6.1 Modèles indépendants du type de forêt . . . 52
3.6.2 Modèles dépendants du type de forêt . . . 54

4 Discussion des résultats **59**
4.1 Éléments de la structure du peuplement de *P. elata* à Yangambi . . . 59
4.2 Accroissement en diamètre et aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale . . 60
4.3 Mortalité naturelle chez *P. elata* . . . 61
4.4 Modélisation de la croissance de *P. elata* . . . 62
4.5 Un peuplement de *P. elata* résultat de son passé sylvicole ? . . . 65

5 Conclusion, perspectives et recommandations **68**
5.1 Conclusion . . . 68
5.2 Perspectives . . . 69
5.3 Recommandations . . . 70

Bibliographie **71**

A Annexes **78**
A.1 Choix des bibliothèques et centres de documentation . . . 78
A.2 Ouverture des layons et inventaire des tiges de *P. elata* . . . 79
A.3 Marquage des arbres dans le dispositif en layon . . . 80
A.4 Indices de compétition . . . 81
A.4.1 Code de Dawkins . . . 82
A.4.2 Indice de forme de la couronne (indice de Van Daalen) . . . 83
A.5 Accroissement moyen annuel périodique en surface terrière . . . 84
A.6 Relation entre le statut social et le diamètre des individus échantillonnés . . . 86
A.7 Modèles de croissance de *P. elata* . . . 86
A.7.1 Détermination des valeurs initiales des paramètres du modèle . . . 86
A.7.2 Statistiques descriptives des variables de compétition . . . 87
A.7.3 Cercle de corrélation de l'ACP . . . 88
A.7.4 Représentation graphique des résidus du modèle diamétrique M1a . . . 89
A.7.5 Distribution résiduelle du Modèle M1a . . . 89
A.7.6 Distribution résiduelle des modèles M2a et M3a . . . 90
A.7.7 Représentation graphique des modèles diamétriques M1b et la distribution des résidus . . . 91
A.7.8 Représentation graphique du modèle diamétrique (M1b) du dispositif en layon . 92

Table des figures

1.1 Représentation de quelques organes de *P. elata* . . . 7
1.2 Aire de distribution naturelle de *P. elata* d'après Mayaux *et al.*, 2003) . . . 8
1.3 Plages de développement des essences forestières . . . 9
1.4 Aperçu de quelques infrastructures de l'INERA-Yangambi . . . 15

2.1 Localisation de la zone d'étude . . . 16
2.2 Diagramme ombrothermique de la région de Yangambi . . . 17
2.3 Carte d'occupation et d'utilisation du sol de la région de Yangambi . . . 20
2.4 Représentation graphique de la remontée des filières bibliographique. . . . 21
2.5 Aperçu schématique du dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement de Yangambi . . . 23
2.6 Illustration d'un circuit de suivi de la dynamique forestière en forêt tropicale . . . 24
2.7 Aperçu schématique d'une placette d'inventaire circulaire . . . 26
2.8 Positionnement du trait de mesure chez les arbres présentant fourches et déformations du tronc. . . . 28
2.9 Représentation schématique du statut social des arbres en forêt. . . . 29

3.1 Distribution spatiale des individus échantillonnés superposée à la carte des blocs d'aménagement . . . 40
3.2 Vue partielle de la distribution spatiale des individus échantillonnés superposée à la carte des blocs d'aménagement . . . 41
3.3 Distribution des individus de *P. elata* en fonction des classes de diamètre en forêt aménagée et non-aménagée . . . 42
3.4 Aperçu de la distribution spatiale des tiges de *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi. . . . 44
3.5 Distribution par classes de diamètre des tiges de *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi . . . 45
3.6 Distribution des accroissements diamétriques annuels moyens en fonction du diamètre initial chez *P. elata* . . . 46
3.7 Distribution par classes de diamètre des accroissements diamétriques moyens périodiques de *P. elata* à Yangambi. . . . 47
3.8 Distribution des accroissements diamétriques moyens périodiques en fonction du statut social chez *P. elata* à Yangambi. . . . 50
3.9 Distribution selon les classes de diamètre du taux (%) de mortalité annualisé de *P . elata* à Yangambi. . . . 51

3.10 Représentation graphique du modèle de croissance M1a de *P. elata* dans la région de Yangambi 52
3.11 Représentation graphique des modèles diamétriques M1b en forêt aménagée et non-aménagée à Yangambi. 55

4.1 Représentation graphique de différentes structures des populations de *P. elata*. 67

A.1 Marquage des arbres suivis dans les blocs d'aménagement de Yangambi. 81
A.2 Schéma descriptif de l'indice de Dawkins 82
A.3 Schéma descriptif des différentes forme de couronne des arbres 83
A.4 Distribution des accroissements annuels moyens périodiques en G en fonction du G initial chez *P. elata*. 84
A.5 Distribution par classes de diamètre des accroissements moyens périodiques en G . . . 85
A.6 Proportions d'individus de *P. elata* par catégorie du statut social 86
A.7 Représentation des corrélations entre les indices de compétition 88
A.8 Représentation graphique des résidus en fonction des indices de compétition 89
A.9 Représentation graphique des résidus du modèle diamétrique M1a 89
A.10 Représentation graphique des la distribution des résidus des modèles M2a et M3a . . . 90
A.11 Représentation graphique du modèle diamétriques (M1b) 91
A.12 Représentation graphique du modèle diamétrique M1c ajusté aux différents niveaux de l'indice de Dawkins. 92
A.13 Représentation graphique du modèle diamétrique M1c ajusté aux différents niveaux de l'indice de Van Daalen. 93

Liste des tableaux

2.1 Récapitulatif des dispositifs expérimentaux et des données disponibles et collectées pour l'étude de *P. elata*. 25
2.2 Distribution des arbres focaux des deux circuits de suivi de la dynamique forestière par classe de diamètre. 27
2.3 Liste des indices décrivant l'intensité de la compétition au voisinage de l'arbre focal . . 34
2.4 Indices qualitatifs de description de l'intensité de la compétition 35

3.1 Fréquence relative (FR), abondance relative (AR) et dominance relative (DR) des espèces d'arbres en forêt aménagée et non-aménagée 43
3.2 Accroissements diamétriques moyens de *P. elata* en fonction des classes de diamètre et des dispositifs 49
3.3 Accroissements diamétriques (en cm/an) de *P. elata* regroupés par statut social. . . . 50
3.4 Modèles ajustés à l'ensemble du jeu de données en excluant l'effet type de forêt 53
3.5 Ajustement des modèles diamétriques M1b et M1c en fonction du type de dispositif en forêt aménagée et non-aménagée. 54
3.6 Corrélation entre les différents paramètres des modèles M1b et M1c 54
3.7 Modèles de croissance (M2b et M2c) dépendant de l'intensité de la compétition 56
3.8 Modèles de croissance (M3b et M3c) dépendant de l'intensité de la compétition 58

A.1 Statistiques descriptives des différentes variables quantitatives de compétition 87

Liste des symboles

$ACNP$ Avis de Commerce Non Préjudiciable

$AMAP$ Accroissement Moyen Annuel Périodique

BST Bibliothèque des Sciences et Technologies

$CITES$ Convention on International Trade of Endangered Species

DBH Diameter at Breast Height

DME Diamètre Minimum d'Exploitation

FRA Forest Resources Assessment

$INEAC$ Institut Nationale d'Étude et de recherche Agronomique du Congo belge

$INERA$ Institut Nationale pour l'Etude et la Recherche Agronomique

$IUCN$ International Union for Conservation of Nature

$MARC$ Musée Royal de l'Afrique Centrale

RCA République centrafricaine

RDC République démocratique du Congo

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Introduction

Les forêts du Bassin du Congo Fournier et Sasson (1983) couvrent une surface d'environ 200 millions d'hectares et présentent une diversité floristique parmi les plus importantes des forêts tropicales denses et humides du monde. Cet écosystème offre une diversité de produits et services indispensables à la survie et au bien-être de plusieurs millions de personnes. Ces millions de personnes dépendants de ces services sont pour la grande majorité riveraines des massifs forestiers. Au fil des années, l'augmentation démographique observée dans ces zones a entraîné une croissance des besoins, avec pour corollaire la réduction des surfaces forestières. D'après Hosonuma *et al.* (2012), l'expansion de l'agriculture serait responsable des trois-quarts de la fragmentation des ressources forestières dans le Bassin du Congo, répartie à parts égales entre l'agriculture de subsistance pratiquée pour alimenter le marché local et l'agriculture industrielle. Le Centre International de Recherche en Agroforesterie (ICRAF, 2000) indique par exemple que l'agriculture itinérante sur brûlis provoque 70 % de la déforestation en forêts denses et humides du Bassin du Congo. Cependant, certaines études soulignent le caractère bénin et non perturbateur, au sens écologique de ce système agricole tel qu'il est mis en œuvre de manière traditionnelle par les populations autochtones des régions forestières tropicales (Demaze et Manusset, 2009). Mais au-delà de ces pratiques ancestrales influençant le couvert forestier dans cette région, il faut aussi noter que depuis les années 1950, la plupart de ces forêts ont été concédées à des entreprises forestières privées et ont depuis lors fait objet d'une exploitation sélective et de manière intensive (Fayolle *et al.*, 2015). Ces différentes pressions anthropiques, ajoutées à la difficulté intrinsèque de résilience de cet écosystème forestier en général et de certaines essences en particulier, restent une préoccupation majeure dans les réflexions sur la gestion durable des ressources forestière du Bassin du Congo.

1.2 Problématique de l'étude

La République démocratique du Congo (RDC) compte environ 128 millions d'hectares de forêts denses et humides, couvrant 54 % du territoire national, représentant 47 % des forêts tropicales Africaines, et 6 % des forêts tropicales du monde (Dickson *et al.*, 2005). Le bloc le plus diversifié couvre une zone de 100 millions d'hectares, dont 60 % sont potentiellement exploitables et capables de produire environ 10 millions de mètres cubes de bois par an (Dickson *et al.*, 2005). Il existe plus de 700 espèces d'arbres en RDC dont environ 30 sont actuellement exploitées, parmi lesquelles *P. elata* (Mbala, 2003; Dickson *et al.*, 2005). *P. elata* est une essence de haute valeur commerciale utilisée dans les construc-

tions maritimes, les revêtements de sol, les placages, en ameublement et en menuiserie (Dickson *et al.*, 2005; Bourland *et al.*, 2012b). Ces différentes utilisations ont contribué à une demande croissante de son bois, aussi bien localement que sur le marché international (Boyemba, 2011; Betti *et al.*, 2017). Cette forte demande aurait depuis plus de 50 ans contribué à la surexploitation de l'espèce, avec pour conséquence, la fragmentation des populations naturelles et la réduction des stocks exploitables. Elle est signalée comme pratiquement éteinte en Afrique de l'ouest où l'exploitation commerciale commença en 1948 [1]. En raison de ces pressions, *P. elata* a été inscrite sur la « liste rouge » de l'IUCN comme espèce en « danger » (critère A1cd) (Bourland, 2013), tout comme à l'annexe II de la CITES (Dickson *et al.*, 2005). Outre l'exploitation sélective (écrémage), plusieurs auteurs signalent une carence de la régénération naturelle chez *P. elata* dans l'ensemble de ses aires naturelles de distribution. Or il est connu que l'établissement de nouveaux individus au sein d'une population d'arbres dépend de la germination des graines nouvellement disséminées ainsi que de leur survie immédiate (Jesel, 2005), par conséquent, le manque de régénération naturelle conduit à l'appauvrissement du potentiel biologique et génétique (Boyemba, 2011). Ainsi donc, la connaissance de la dynamique de régénération des espèces forestières de grande valeur commerciale (Dupuy *et al.*, 1998) comme *P. elata*, est une condition *sine qua non* pour le maintien de la productivité de la ressource et sa disponibilité sur le long terme. Bien que plusieurs auteurs se soient penchés sur la question, peu de travaux mettent en évidence les causes précises de ce faible niveau de régénération naturelle chez *P.elata*. Tout comme ce déficit de régénération naturelle, des approches sylvicoles pouvant garantir une meilleure performance de *P. elata* en peuplement naturel comme en plantation sont aujourd'hui très peu connues ; en dépit des essais jusqu'ici entrepris. Néanmoins, des essais sylvicoles initiés par l'INEAC à Yangambi il y a plusieurs décennies montrent des résultats assez prometteurs aujourd'hui. Dès lors, il nous semble important dans cette étude de passer en revue des archives qui pourraient nous renseigner sur les approches sylvicoles qui avaient été appliquées et comprendre ses conditions de croissance, afin de formuler des recommandations pouvant contribuer à l'aménagement durable cette espèce.

1.3 Objectifs et hypothèses de recherche

1.3.1 Objectif général

L'objectif général de cette étude est de rassembler des informations fiables sur les méthodes sylvicoles appliquées à *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi à l'époque de l'INEAC, et d'améliorer les connaissances sur ses conditions de croissance, afin de formuler des recommandations pour des aménagements futurs.

1.3.2 Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, il s'agit dans cette étude :

— De décrire les différentes méthodes sylvicoles appliquées à *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi.

— De caractériser le peuplement actuel en termes de structure, de croissance diamétrique et de mortalité naturelle.

— D'élaborer un modèle de croissance diamétrique de *P. elata*.

1. https://www.nap.edu/read/19836/chapter/1

— De formuler des recommandations en termes de sylviculture à destination des États membres des forêts du Bassin du Congo et des compagnies d'exploitation forestière.

1.3.3 Hypothèses de recherche

Les objectifs spécifiques énumérés ci-dessus (*cf.* § 1.3.2) visent à vérifier les hypothèses suivantes :

1. Les activités passées de l'INEAC visant *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi donnent des résultats positifs en matière de régénération naturelle aujourd'hui
2. Il est possible d'identifier ces activités ayant eu des effets bénéfiques sur la régénération naturelle de *P. elata*
3. La croissance et les risques de mortalité au stade d'adulte et pré-adulte pourraient varier fortement d'un arbre à l'autre
4. Il est possible d'identifier les variables explicatives à l'origine de la variation de la croissance d'un arbre à l'autre et de modéliser la croissance en fonction de ces paramètres

1.4 Articulation du mémoire

Ce travail est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'introduction générale, qui aborde le contexte de l'étude ; la problématique et enfin les objectifs et les hypothèses de recherche qui serviront de balise à nos différentes démarches. Le deuxième chapitre porte sur la revue de la littérature, qui nous apporte les éléments nécessaires pour cerner l'état actuel des connaissances aussi bien sur notre modèle d'étude que sur les aspects connexes à notre thématique de recherche. Le troisième chapitre, tout en décrivant le milieu d'étude, décrit la méthodologie qui nous permettra d'obtenir les résultats escomptés. Le chapitre quatre est consacré aux différents résultats obtenus. Ces résultats sont discutés au cinquième chapitre. Enfin au chapitre six nous tirons les conclusions de ce travail, tout en formulant des recommandations sur l'aménagement durable de *P. elata*, à l'endroit des décideurs et des acteurs de la filière.

1.5 Dynamique forestière et perturbations en forêt tropicale africaine

1.5.1 Agriculture itinérante sur brûlis

Dans l'étendue du territoire de la RDC, la grande majorité des forêts peuvent être considérées comme ayant subi, dans le passé, une forme de perturbation ayant pour origine principale les cultures vivrières pratiquées coutumièrement - l'agriculture itinérante sur brûlis. Cette expression désigne ainsi plusieurs variantes de pratiques agricoles traditionnelles courantes en régions forestières tropicales : *abattis* en Guyane française, *ray* en Indochine, *ladang* en Indonésie, *tavy* à Madagascar, *roça* au Brésil et *ekoto* au Sud Cameroun (Demaze et Manusset, 2009). C'est une pratique caractéristique au cours de laquelle la majorité des végétaux d'une parcelle donnée est abattue, brûlée après un nombre de jours de séchage. La parcelle est par la suite débarrassée des branches et feuilles qui n'ont pas brûlé et est enfin semée (Zapfack, 2005). Quelques années d'exploitation après, cette dernière est laissée en jachère. Englobant les années d'exploitation et les années de jachère, le temps d'utilisation d'une parcelle peut être ainsi porté jusqu'à 7 ans (Demaze et Manusset, 2009). Ce système de culture longtemps destiné à la consommation locale, s'est intensifié avec la poussée démographique, l'accès aux marchés, la création de nouvelles routes et surtout le passage de grandes concessions forestières qui, en ouvrant des

routes et des pistes de débardage ont facilité l'avancée des populations pour l'occupation de nouvelles terres (Zapfack, 2005). Cependant, sous l'effet de l'accroissement de ces pressions anthropiques, il est à craindre que les différentes formes traditionnelles de l'agriculture itinérante participent de plus en plus à la déforestation suite à la réduction de la période de jachère. Cette tendance récente est déjà observée dans la région de Yangambi, où la réserve forestière et les parcelles forestières d'expérimentations scientifiques (blocs d'aménagement) subissent de fortes pressions, dues notamment à cette explosion démographique. Dans cette région, les essences forestières comme *P. elata* sont de plus en plus exploitées localement pour combler le déficit économique dû à la situation socio-économique actuelle. Il est donc urgent de trouver des solutions (agroforesterie, plan d'aménagement forestier, reboisement, concessions foncières) pour adapter l'agriculture itinérante sur brûlis à l'évolution des contextes socio-économiques et aux contraintes spatiales (Demaze et Manusset, 2009), ceci afin de réduire son impact sur les forêts en général et sur les espèces de haute valeur commerciale en particulier.

1.5.2 Exploitation forestière

Les forêts du Bassin du Congo sont depuis longtemps exploitées par des compagnies forestières privées à qui les États ont attribué des concessions forestières. L'exploitation au sein de ces concessions est essentiellement sélective. L'impact de ces exploitations sélectives sur la dynamique de la régénération naturelle des essences forestières reste problématique.

Selon (Dupuy *et al.*, 1998), l'arbre, lors de son abattage, déracine, blesse, casse et écrase directement un certain nombre de tiges dans les différentes strates de la forêt. Cet auteur signale qu'il y a des conditions particulières où les cimes des arbres sélectionnés sont reliées par des lianes ligneuses. Dans de telles conditions, l'arbre en cours d'abattage peut aussi entraîner avec lui des arbres voisins, les brisant ou les déracinant ; en plus, lors des opérations de débardage, de nouveaux dégâts sont occasionnés au peuplement. Ces dégâts concernent essentiellement les strates basses et en particulier la régénération naturelle. Il est aussi à noter que les dégâts occasionnés par l'ouverture des routes forestières sont non négligeables. Medjibe *et al.* (2011) pensent par ailleurs que, outre les impacts directs (prélèvements et dégâts d'abattage) de l'exploitation forestière telle qu'elle est pratiquée dans les concessions aménagées (dans lesquelles sont parfois mises en œuvre des techniques d'exploitations à impact réduit) et non-aménagées, des impacts indirects à plus long terme vont également s'exercer sur la dynamique des espèces exploitées, la reconstitution des stocks exploitables entre deux rotations, et d'une façon plus générale sur la productivité des forêts sur le long terme.

Cependant, Karsenty *et al.* (2016) rapportent en ce qui concerne les concessions forestières que les exigences légales requièrent d'atteindre des taux minima de reconstitution de la ressource, ce qui se traduit par une augmentation des diamètres minimum d'exploitation (DME) et les plans d'aménagement prescrivent une diversification des espèces exploitées afin d'éviter une baisse des volumes récoltés. Pour Fargeot *et al.* (2004), les prélèvements assez considérables de l'ordre 60 m^3 à l'hectare lors d'une première exploitation ne remettraient pas en cause la dynamique forestière : surtout qu'une mise en repos de la forêt suffisamment longue permettrait théoriquement de reconstituer une forêt très comparable à la forêt initiale.

1.5.3 Déforestation

Les forêts du Bassin du Congo sont parmi les écosystèmes forestiers les plus intacts du monde (Mbala, 2003; Tchatchou *et al.*, 2015). Elles fournissent une variété de services écosystémiques (par

exemple, la protection des eaux et des sols) et abritent des milliers d'espèces végétales et de nombreuses espèces animales menacées (Medjibe *et al.*, 2011). Mais pourtant, depuis quelques décennies beaucoup de voix s'élèvent au sein de la communauté scientifique et de la société civile pour tirer la sonnette d'alarme face au rythme de diminutions des surfaces forestières dans le Bassin du Congo. Effet, la déforestation définie par Hosonuma *et al.* (2012) comme la conversion d'une forêt en une autre forme d'occupation spatiale ou comme la réduction à long terme du couvert forestier sous un seuil de dix pour cents (Gillet *et al.*, 2016) est l'une des principales menaces qui pèsent sur la pérennité et la stabilité cet écosystème forestier.

La conversion du couvert forestier en un couvert alternatif (agriculture, plantation à grande échelle ou urbanisation) peut être liée à l'augmentation de la pression démographique (Gillet *et al.*, 2016). Les besoins sans cesse croissants des populations riveraines des massifs forestiers sont aujourd'hui couplés à une forte demande extérieure des terres pour des plantations agricoles à grandes échelle. Hormis cela l'extraction du bois (extraction commerciale, bois de chauffage, poteaux, production de charbon de bois) sous-jacente au facteur démographique est non négligeable.

Dans la région de Yangambi, les pressions anthropiques sur la réserve sont très perceptibles. La conversion des forêts pour des besoins agricoles et en charbon de bois aux fins d'approvisionner les zones urbaines y constitue le principal facteur de déforestation. Cette pratique présente déjà une forte menace pour les populations relictuelles de *P. elata* dans cette région.

1.5.4 Régénération naturelle des essences forestières tropicales

Les forêts tropicales humides constituent, parmi les écosystèmes terrestres, l'un des plus vastes. Le caractère sans doute le plus frappant de ces forêts est leur très grande richesse floristique ou diversité au niveau des arbres (Alexandre, 1977). Cependant, le déficit de régénération naturelle se pose avec acuité chez certaines espèces d'arbres dominantes de la canopée forestière où il est rare de trouver des tiges juvéniles sous les semenciers ou à proximité. La régénération en forêt tropicale est un processus qui apparaît principalement dans des conditions naturelles, le plus souvent à la faveur de chutes d'arbres ou encore à la suite de perturbations souvent liées aux activités humaines. Ce processus se traduit par l'apparition de trouées dans la canopée forestière. Le microclimat régnant dans le sous-bois forestier est ainsi périodiquement modifié par ces accidents naturels ou provoqués par l'homme (Dupuy *et al.*, 1998).

Pourtant, selon Devineau (1984) et Nusbaumer (2003) le succès de la régénération naturelle d'une espèce dans le milieu forestier repose principalement sur trois facteurs : (i) la possibilité qu'ont ses diaspores à atteindre le milieu (ii) son adéquation avec les conditions du milieu et (iii) sa capacité à résister à la concurrence interspécifique. L'une de ces trois conditions pourrait expliquer ce déséquilibre entre les tiges adultes et juvéniles en forêt tropicale. Cependant, Janzen (1970) et Connell (1971) ont indépendamment supposé que les ennemis naturels agissaient pour augmenter la distance entre les semis et les adultes, en s'attaquant de façon disproportionnée aux semis sous les semenciers (Schupp, 1992).

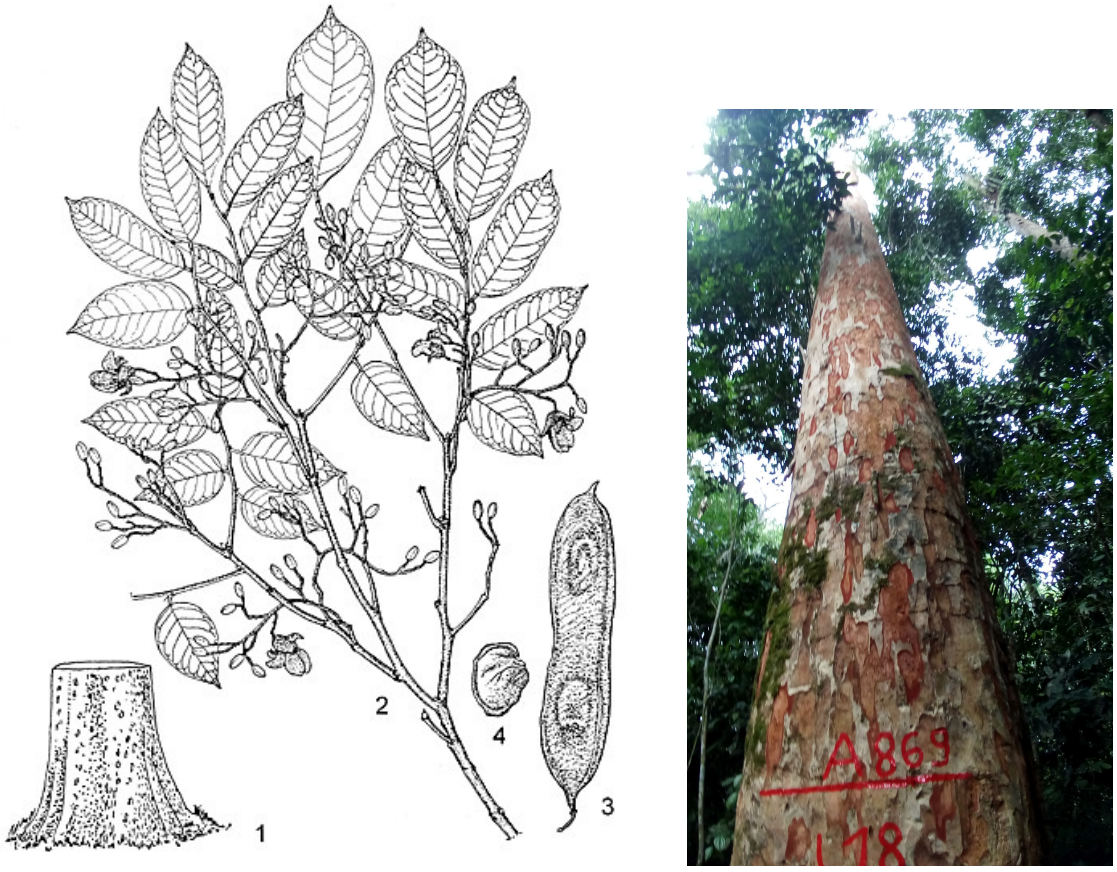
P. elata est un exemple de ces espèces qui présentent un déséquilibre démographique (Obiang *et al.*, 2013) assez prononcé dans son aire naturelle de distribution. Les connaissances sur la dynamique de la régénération naturelle de cette espèce restent encore très fragmentaires à ce jour. Et pourtant, elles sont et restent une priorité pour garantir sa pérennité, sa productivité et sa disponibilité.

1.6 Description du modèle d'étude

1.6.1 Brève description de l'espèce

Les informations de cette section proviennent des auteurs suivant : (Louis, 1943) ; Toussaint *et al.* (1953) ; Bonnier (1957) ; Taylor (1960) ; Hawthorne et Jongkind (2006) ; Anglaaere (2008) ; Kouadio *et al.* (2014) ; Yendjogi (2009) ; Vivien et Faure (2011) ; Bourland *et al.* (2012b).

P. elata désigne une espèce d'arbre des forêts tropicales Africaines qui couvre une aire naturelle de distribution assez diversifiée. La dénomination commerciale de cette essence dans chacun des pays où elle est rencontrée, témoigne bien de cette diversité d'aire naturelle de distribution : *Afromosia* en RDC et au Congo, *Assamela* au Cameroun et en Côte d'Ivoire, *kokrodua* au Ghana et *Obang* en RCA (Bourland *et al.*, 2012b). Le Genre *Afromosia* fut créé par Harms (1913), dans le but de séparer les espèces Africaines (avec des gousses plates indéhiscentes) des espèces Asiatiques et Américaines (avec des gousses déhiscentes gonflées). Cependant, elle fut initialement incluse dans le Genre *Ormosia* Jacks. Une description supplémentaire de cette espèce fut faite par Louis (1943) et par la suite, Knaap-van Meeuwen (1962) transforma *Afromosia* en *Pericopsis* (Bourland *et al.*, 2012b). Aujourd'hui, le genre *Pericopsis* comprend 4 espèces, dont 3 (*P. elata* (Harms) Meeuwen, *P. laxiflora* (Benth) Meeuwen et *P. angolensis* (Baker) Meeuwen) se trouvent en Afrique tropicale et *P. mooniana* (Thwaites) en Asie tropicale. *P. elata* est une ligneuse appartenant à la famille des Fabaceae (Leguminosae) pouvant atteindre jusqu'à 50 m de haut et 1,70 m de diamètre à 1,30 m du sol. Parfois tortueux, son fût rectiligne et cylindrique est dépourvu de branches jusqu'à environ 30 m de haut et présente souvent des contreforts bas et obtus. L'écorce a 0,5 à 1,5 cm d'épaisseur et est de couleur crème ou grisâtre. Elle se desquame en fins morceaux laissant des taches rouge-brunes (figure 1.1 b). La cime aplatie est composée d'un feuillage léger un peu retombant, porté par des rameaux étalés horizontalement et glabres. Les feuilles sont habituellement imparipennées (avec 5 à 11 folioles). Le pétiole et le rachis mesurant ensemble 7 à 20 cm de long, sont légèrement sillonnés sur la face supérieure. Les folioles sont alternes, elliptiques à ovales-elliptiques ; avec 3 à 8 cm de long et 1,5 à 3,5 cm de large, la terminale est plus grande, légèrement cunéiforme, arrondie à la base, courtement acuminée à l'apex, glabre et pennatinervée avec 5 à 11 paires de fines nervures. L'inflorescence est en panicule mince, retombante, atteignant 12 cm de long à l'extrémité d'une pousse à pubescence clairsemée mesurant une longueur 12 cm. Le fruit est une gousse indéhiscente et contient 1 à 4 graines (discoïdes brunes de 12 à 15 mm de diamètre), avec un poids moyen d'environ 1,44 $\pm$ 0,11 g par gousse. La plantule a une germination épigée, qui se produit généralement 5 à 15 jours après le semis. Les deux premières feuilles sont simples, opposées ou subopposées de couleur vert-foncé avec 5 à 8 paires de nervures. Les jeunes arbres montrent souvent une structure spatiale en agrégat, caractéristique de l'espèce. Des insectes Lépidoptères et des Chrysalides de la famille des *Tortricidea* ont été identifiés comme pouvant avoir un impact sur la croissance des plantules et/ou les taux de survie de *P. elata* dans les plantations (Addo-Danso, 2010; Bourland *et al.*, 2012b; Essono *et al.*, 2017).



(a) (b)

Figure 1.1 – (a) Représentation de quelques organes de *P. elata* : 1, base du fût ; 2, branche en fleurs ; 3, fruit ; 4, graine (Louis et Fouarge, 1943). (b) pied adulte de *P. elata* présentant des taches de desquamation (blocs d'aménagement de Yangambi, 27 mars 2018).

1.6.2 Aire naturelle de distribution

P. elata est caractéristique des forêts guinéo-équatoriales d'Afrique de l'Ouest et Centrale. D'après Louis (1943) l'espèce fut découverte par Milbread en 1911 dans la forêt équatoriale primitive au Sud du Cameroun. Il est reconnu que son aire de distribution naturelle s'étendant initialement d'Afrique de l'Ouest jusqu'au Bassin du Congo, est aujourd'hui disjointe (Bourland, 2013; UNEP-WCMC, 2018). *P. elata* se rencontre dans la partie Est de la Côte d'Ivoire, au Centre-Ouest du Ghana, au Sud-Est du Cameroun, au Congo, en République Centrafricaine et dans la province de l'Equateur et la province Orientale en RDC (Yendjogi, 2009; Betti *et al.*, 2017). Elle fut signalée au Nigeria au début du 20ème siècle, mais aujourd'hui elle y est presque éteinte (Howland, 1979; Bourland *et al.*, 2012b. Au Ghana, *P. elata* est restreinte à des zones à pluviométrie moyenne annuelle d'environ 1250 à 1500 mm. Au Sud-Est du Cameroun les populations de *P. elata* sont rencontrées sur plateau à environ 600 à 700 m au-dessus du niveau de la mer, avec une pluviométrie moyenne annuelle d'environ 1625 mm (Bourland *et al.*, 2015). Cependant, Essono *et al.* (2017) ont observé que *P. elata* montre une distribution spatiale en fonction du réseau hydrographique dans la forêt dense humide de Zoulabot et Bidou (Cameroun). Ces auteurs signalent avoir noté une répartition agrégée de *P. elata* qui côtoie tous les cours d'eau se jetant dans la rivière Dja. Ils indiquent de ce fait que l'espèce pourrait avoir des tendances ripisylves. Cette assertion corrobore la description de la distribution de *P. elata* faite par Boyemba (2011) en RDC. Celui-ci relève que le taxon est bien représenté dans le triangle Yangambi – Banalia – Bafwasende et

traverse l'hinterland de Yanonge pour atteindre la rive gauche du fleuve Congo.

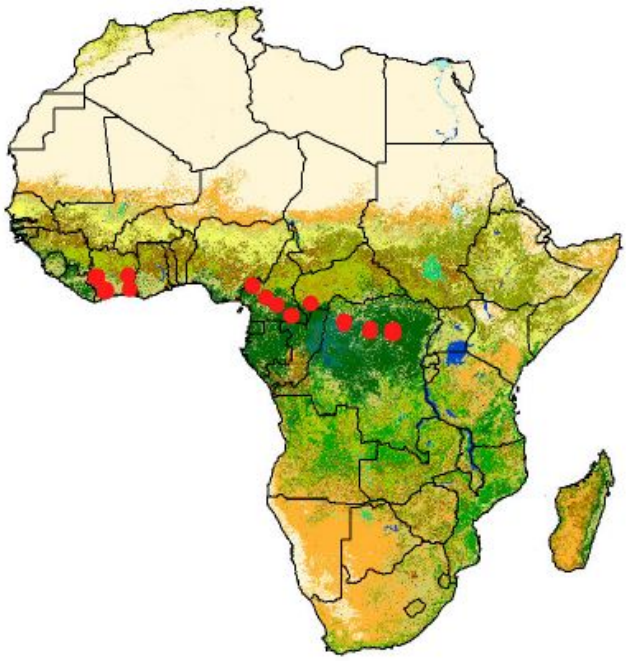


Figure 1.2 – Aire de distribution naturelle de *P. elata* d'après Mayaux *et al.*, 2003 et African Plants Database, http ://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa/. Les points rouges correspondent aux zones de présence de *P. elata* dans les pays concernés. Source : Bourland *et al.* 2012b

1.6.3 Tempérament

D'après Tshibangu (2010), la lumière revêt une importance toute particulière dans les phénomènes physiologiques des plantes par le fait qu'elle pourvoit de l'énergie indispensable à la réalisation de la photosynthèse et à d'autres processus physiologiques. La lumière est de ce fait, essentielle au développement d'une plante et la compétition pour cette ressource est permanente au cours de sa vie (Boyemba, 2011). Ainsi, pour pouvoir améliorer la gestion d'une espèce forestière comme *P. elata*, une connaissance approfondie de son tempérament vis-à-vis de la lumière s'avère indispensable. Dans le but de mieux comprendre le tempérament de quelques essences commerciales, et se référant aux travaux d'Oldeman et van Dijk (1991), Doucet (2003) propose une classification des tempéraments basée sur des « plages de développement ». Cet auteur signale que, chaque espèce connaîtrait un développement optimal au sein d'une de ces plages.

Selon cette classification proposée par Doucet (2003), on peut distinguer quatre niveaux de tempérament (figure 1.3).

(i) Les sciaphiles modérées sont décrites comme des espèces capables de grandir dans la pénombre de la forêt ; le stade de développement de la jeune tige dans le sous-bois est plus ou moins rapide selon le degré d'irradiance. Cette stratégie est qualifiée de « Strugglers » dans la classification d'Oldeman et van Dijk. La structure de population en forêt mature s'approche d'une exponentielle décroissante ; ces espèces possèdent une densité relative très élevée en tiges de faible diamètre. Peu d'essences commerciales appartiennent à cette catégorie.

(ii) Les semi-héliophiles dans les premiers stades de développement sont capables de résister assez longtemps dans le sous-bois, mais nécessitent à un stade de leur développement une ouverture du couvert. Ce sont des intermédiaires entre les « Strugglers » et les « struggling gamblers » dans la

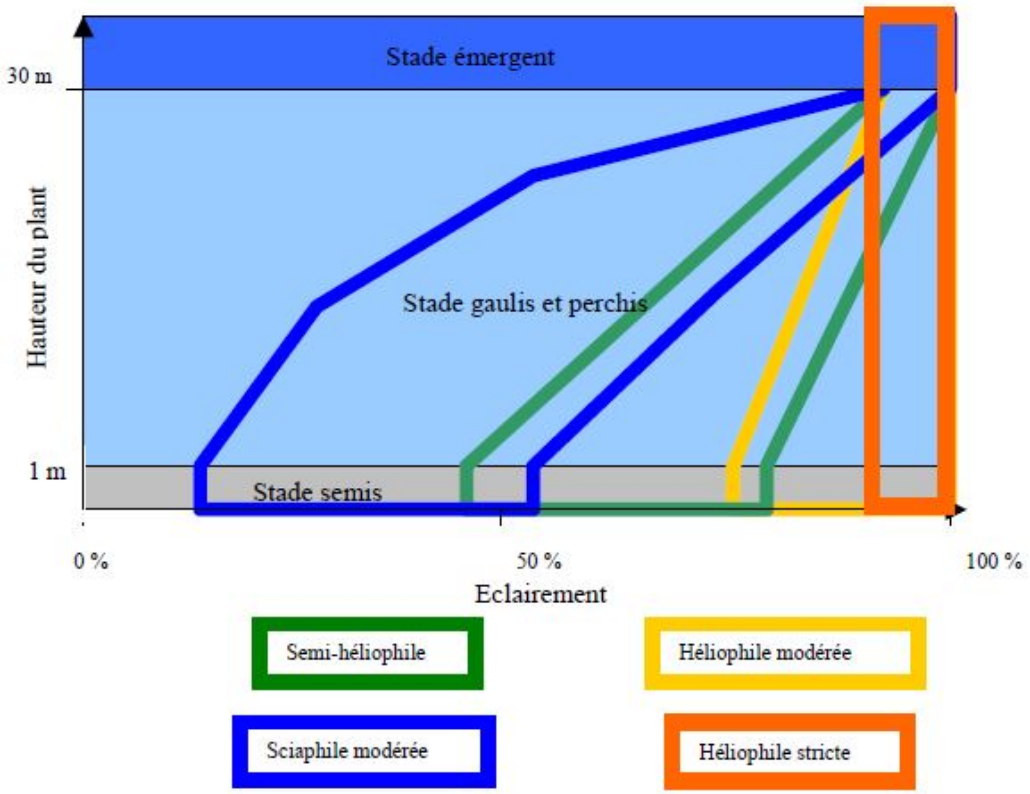


Figure 1.3 – Plages de développement des essences forestières d'après Doucet (2003)

classification d'Oldeman et Van Dijk. La structure de populations en forêt mature a une allure de courbe décroissante plus ou moins étalée, plus ou moins dotée de bosses.

(iii) Les héliophiles modérées nécessitent pour leur installation un couvert assez léger, mais par la suite une ouverture importante du couvert est indispensable pour leur croissance. Celles-ci sont qualifiées de « Struggling gamblers » par Oldeman et Van Dijk (1991) ; la structure de population en forêt mature a une allure en cloche plus ou moins tronquée sur la gauche.

(iv) Les héliophiles strictes sont incapables de se régénérer sans perturbation importante du couvert. Ce sont en général des espèces pionnières, caractérisées par une fructification abondante, des graines de petites dimensions qui font le plus souvent partie de la banque de graines du sol. Cette stratégie est encore appelée « Nard gamblers » dans la classification d'Oldeman et Van Dijk (1991). Leurs structures de population présentent typiquement une allure gaussienne qui semble être la conséquence de vagues de colonisation suite à des facteurs anthropiques ou paléoclimatiques (Doucet, 2003).

Les sciaphiles (non représentées dans la figure 1.3) sont des espèces inféodées au sous-étage. Cette stratégie est encore appelée « hard Strugglers » dans la classification d'Oldeman et van Dijk (1991). Ces espèces n'atteignent jamais de grandes dimensions. Elles ont par conséquent en forêt mature une structure de population qui a une allure de « j inversé » (Doucet, 2003).

Pour plusieurs auteurs (Ampofo et Lawson, 1972; Hawthorne, 1995; Veenendaal *et al.*, 1996; Kyereh *et al.*, 1999; Boyemba, 2011; Bourland, 2013), *P. elata* est une espèce héliophile voire pionnière longévive, c'est-à-dire exigeante en lumière à tous les stades de son développement. Bien qu'étant une essence délicate et sciaphile en son jeune âge, l'ombrage dense a tendance à contrarier la croissance de *P. elata*. Pour que l'espèce connaisse un développement favorable et assez rapide, un ombrage léger est préférable dans les premiers stades de son évolution (Lebrun et Gilbert, 1954). À maturité, l'espèce devient typiquement héliophile (Tshibangu, 2010). Dans les conditions naturelles non perturbées, donc

caractérisées par une faible extension spatiale des ouvertures, *P. elata* présente une structure diamétrique en « cloche » avec un plus grand nombre d'individus dans les classes de diamètre médianes et très peu dans les classes de diamètre inférieures, typique des espèces exigeantes en lumière souffrant d'une pénurie de régénération (Bourland *et al.*, 2012b). Les individus jeunes grandissent donc rapidement si les conditions de luminosité sont bonnes, et ils meurent dans le cas contraire. Cependant, toute la difficulté est de pouvoir estimer la quantité d'irradiance nécessaire pour chaque phase de développement de *P. elata*.

1.6.4 Phénologie et dispersion de *P. elata*

La phénologie est une discipline qui étudie la répartition dans le temps des phénomènes périodiques caractéristiques des cycles vitaux des organismes dans la nature. Dans le domaine de la Botanique, elle s'intéresse à l'influence du climat sur les phénomènes de floraison, de défeuillaison, de feuillaison et de fructification des végétaux tant au point de vue de leur durée, de leur intensité que de l'époque à laquelle ils se produisent (Tshibangu, 2010). *P. elata* est une espèce caducifoliée à dispersion anémochorique (Essono *et al.*, 2017). La défoliation de cette espèce est généralement annuelle et dure de deux à trois semaines (Boyemba, 2011; Bourland *et al.*, 2012b). Au Sud-Est du Cameroun, elle survient entre janvier et mars ; avec un pic en février ; en moyenne 71,0 ± 3,7 % des individus restent défeuillés durant cette période (Bourland *et al.*, 2012b). Cependant, Essono *et al.* (2017) ont observé une absence de chute de feuilles chez des individus improductifs de *P. elata* dans la forêt dense humide de Zoulabot et Bidou (Cameroun). Dans la région de Kisangani, la défoliation apparaît entre janvier et février et de nouvelles feuilles apparaissent le plus souvent au début de la saison des pluies en mars (Boyemba, 2011). La plupart des auteurs (Louis et Fouarge, 1943; Anglaaere, 2008; Tshibangu, 2010; Boyemba, 2011; Bourland *et al.*, 2012b; Laure *et al.*, 2014; Essono *et al.*, 2017) qui se sont penchés sur la phénologie de *P. elata*, s'accordent sur le fait que ses différentes phénophases sont fortement dépendantes des variations climatiques saisonnières. Essono *et al.* (2017) ont confronté les précipitations moyennes annuelles obtenues à partir de chutes de pluies relevées dans les régions côtière et continentale de la forêt dense humide de Zoulabot et Bidou (Cameroun) de 2006 à 2015 avec le début de la phénologie fruitière de *P. elata*. Ils confirment à cet effet que la phénologie de ce taxon est corrélée aux facteurs bioclimatiques. Au Cameroun, la floraison a lieu exclusivement en mars-avril, période marquant le début de la petite saison des pluies (Bourland *et al.*, 2012b). Cependant, les travaux de Bourland *et al.* (2012b) menés sur une période d'observation de cinq ans révèlent un diamètre minimal de reproduction des populations de *P. elata* de 32,3 cm, un diamètre effectif de floraison de 37 cm, et avec un taux interannuel de floraison variant entre 76,0 et 85,7 %. Dans la région de Kisangani, la floraison couvre la période de transition entre la saison sèche et la saison des pluies et toute la période de la petite saison des pluies, qui correspond aux mois de mars et mai ou juin (Boyemba, 2011). Taylor (1960) indique que dans son aire de distribution au Ghana, *P. elata* fleurit entre avril et mai. Pour ce qui est de la fructification, dans la région de Kisangani, Hawthorne (1995) rapporte que *P. elata* produit des gousses, qui peuvent être dispersées à partir du mois de juin jusqu'au mois de novembre ou décembre. Bourland *et al.* (2012b) affirment à l'issue de leurs travaux au Sud-Est du Cameroun, avoir observé les fruits de *P. elata* entre avril et décembre. Ces observations sont similaires à celles de Essono *et al.* (2017). Les fruits sont disséminés dès le début du mois de novembre, ce qui correspond au début de la saison sèche (Essono *et al.*, 2017). Tout comme dans les régions susmentionnées, la phénologie de *P. elata* a été étudiée par Tshibangu (2010) dans la région de Yangambi. Cet auteur signale que dans cette région, la défeuillaison de *P. elata* se déclenche préférentiellement en février, la floraison en mars ; le

début de la fructification se situe en avril. Il indique qu'une amplitude d'au moins huit mois sépare la fructification de la dissémination qui a lieu en décembre. Cet auteur a évalué dans cette étude, la durée moyenne annuelle de chaque phénophase de *P. elata* dans la région de Yangambi. Il a ainsi signalé une durée de 7,5 jours pour la défeuillaison, de 17 jours pour la floraison, de 176 jours pour la fructification et de 12 jours pour la dissémination.

1.6.5 Aménagement des populations naturelles de *P. elata*

Une recherche de compromis pour concilier les différentes dimensions de la gestion forestière avait été menée au sommet de la CNUED (Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement) à Rio de Janeiro en 1992. Cela avait abouti au concept de « gestion durable » des forêts et à la nécessité de développer les plans d'aménagement forestier. Un des fondements de l'aménagement forestier durable dans le cadre des exploitations forestières de bois d'œuvre, est de prélever des arbres tout en assurant la disponibilité des tiges pour le futur (Eckebil *et al.*, 2017). Au sein des pays du Bassin du Congo, les compagnies forestières sont obligées de mettre en œuvre des plans d'aménagement basés sur des inventaires spécifiques, un minimum d'années de rotation (par exemple de 30 ans au Cameroun) et le calcul du taux de reconstitution des espèces commerciales au cours de cette période (Durrieu De Madron, 1998; Bourland *et al.*, 2012b). Le diamètre minimum d'exploitabilité (DME) est perçu comme étant un outil fondamental d'aménagement durable qui tient compte de la structure diamétrique des populations d'arbres et de la nécessité de préserver de l'abattage la fraction des semenciers devant assurer la régénération (Durrieu De Madron, 1998; Eckebil *et al.*, 2017). Le DME d'Afromorsia est de 60 cm en RDC et au Congo, 110 au Ghana et 90 au Cameroun (Bourland *et al.*, 2012a). Dans ces pays, le DME est fixé par voie réglementaire et peut être révisé par le gestionnaire forestier dans le but d'assurer un taux de reconstitution suffisant au bout de la première rotation (Bourland *et al.*, 2012a).

Toujours dans un souci de contribuer à un aménagement durable de la ressource, *P. elata* a fait l'objet d'un intérêt considérable et d'actions de la part de plusieurs organismes internationaux et régionaux, préoccupés par son devenir. C'est ainsi qu'en 2003, l'espèce a été enregistrée comme « en danger » dans la liste rouge de IUCN, à la suite du constat d'un déclin marqué dans certains pays de son aire de répartition naturelle, notamment en Côte d'Ivoire au Ghana et au Nigéria. *P. elata* a été également inscrite à l'Annexe II de la Convention sur le commerce international des espèces en danger d'extinction (CITES) (Dickson *et al.*, 2005). Cette inscription de l'espèce à l'appendice II de la CITES oblige désormais tous les États membres de la CITES à produire avant toute exportation de produits issus de cette espèce (bois sciés ou grume), un avis de commerce non préjudiciable (ACNP). Ce document garantit de ce fait que l'exportation de ces produits ne nuira pas à la survie de l'espèce dans le milieu naturel (Boyemba, 2011).

1.6.6 Régénération naturelle de *P. elata*

P. elata est une espèce grégaire extrêmement abondante à l'échelle locale (Fayolle *et al.*, 2015). Mais son aire de distribution naturelle, aujourd'hui en régression, couvrait autrefois plusieurs régions d'Afrique, allant de la Côte d'Ivoire à la République démocratique du Congo (Bourland *et al.*, 2012a). Cependant, elle est presque éteinte en Afrique de l'Ouest et ce, en raison de la surexploitation subie dans les années 50 et 60, voire 70 (Hawthorne, 1995; Boyemba, 2011). La surexploitation demeure donc la principale cause de la diminution des populations de *P. elata* dans l'ensemble de son aire

naturelle de distribution. Toutefois, la mauvaise gestion de ses populations serait aussi une cause. Au-delà de ces facteurs anthropiques, l'autoécologie de l'espèce qui ne fait toujours pas l'unanimité chez la plupart des auteurs, semble ne pas être favorable à sa pérennité. Taylor (1960) rapporte que *P. elata* produit annuellement une quantité suffisante de graines qui puisse garantir la régénération de l'espèce. Néanmoins, cet auteur signale que les semis naturels de *P. elata* sont remarquablement rares. Ce constat d'une régénération naturelle très déficitaire a été confirmé par Boyemba (2011) dans la région de Kisangani. Dans la suite de ces travaux, Boyemba (2011) rapporte que l'absence de régénération naturelle est aussi mentionnée par Hawthorne (1995) dans toutes les forêts de son aire de répartition au Ghana. Inféodée presqu'exclusivement au Sud-Est au Cameroun, *P. elata* montre aussi de faibles niveaux de recrutement et de régénération sous canopée dense, comme l'ont mentionné Forni (1997) ; Fayolle *et al.* (2015) et Essono *et al.* (2017). Selon Boyemba (2011), la principale hypothèse explicative du manque de régénération naturelle chez *P. elata* serait le manque de lumière dans le sous-bois. Face à ces différentes observations, Doucet *et al.* (2016) affirment que la sylviculture peut aider à pallier cette carence de régénération naturelle de *P. elata* et par conséquent, contribuer à la reconstitution des stocks exploitables.

1.6.7 État actuel des connaissances sur la sylviculture et la croissance de *P. elata*

Depuis plusieurs décennies, des auteurs (Tshibangu, 2010; Boyemba, 2011; Bourland, 2013; Laure *et al.*, 2014; Ouédraogo *et al.*, 2014; Fayolle *et al.*, 2015; Doucet *et al.*, 2016; Essono *et al.*, 2017; Betti *et al.*, 2017) se sont intéressés à diverses thématiques de recherche concernant *P. elata*.

Pour ce qui est de la sylviculture, des essais de plantation ont déjà été réalisés aussi bien en peuplement naturel qu'en plein (Bourland *et al.*, 2012b). Toutefois, la littérature mentionne peu d'informations sur les plantations de *P.elata* (Hawthorne, 1995). Néanmoins, en RDC, des essais de plantation avaient été initiés par l'Institut National d'Etude et de Recherche Agronomique du Congo belge (INEAC), notamment dans l'arboretum de Yangambi où, 16 ans plus tard une hauteur moyenne de 14,5 m et un diamètre de 130 mm avaient été enregistrés (Donis, 1956). Tandis qu'au Cameroun, quelques décennies plus tard (1972 et 1975) 5 essais sylvicoles à titre expérimental avaient aussi été mis en place, notamment à Makak (Beng-Nyong), Kumba, Mbalmayo (Bilik) à l'école nationale des forêts (ENEF), dans la réserve forestière de Ndeng ndeng (bloc Ke'be') et dans la réserve forestière de Kienke-Sud (bloc Bidou II) (Grison, 1979). Ces essais avaient pour but de rechercher la meilleure densité de plantation de *P. elata*. Mais plus tard, il s'est avéré que les conditions stationnelles n'étaient pas adéquates pour le plein épanouissement de l'espèce comme dans son milieu naturel (Betti *et al.*, 2017). Par ailleurs pour diverses autres raisons, ces plantations furent abandonnées pendant plus de 20 ans (Betti *et al.*, 2017), et certaines notamment celles de Bilik et de Kumba ont succombé face aux pressions anthropiques (exploitation illégale ; extension des parcelles culturales ; urbanisation). Ces pressions ont conduit à une réduction considérable de la surface totale initialement plantée, estimée à 14 ha (Ngueguim *et al.*, 2012). Les travaux réalisés par Betti *et al.* (2017) entre 2009 et 2015 dans ces plantations forestières, notamment celles de Ndeng ndeng (bloc Ke'be') et Kienke-Sud, visant à évaluer la réponse de *P. elata* aux éclaircies montrent que les parcelles éclaircies ont gagné en surface terrière au moins 6 m^2/ha contre 1 m^2/ha pour les parcelles non éclaircies. Ces auteurs signalent un accroissement annuel moyen en diamètre de 0,45 cm/an dans les parcelles éclaircies contre 0,34 cm/an dans les parcelles non éclaircies au cours de la même période pour ces deux stations. Kouadio *et al.* (2014) et Bourland *et al.* (2010) ont obtenu dans les peuplements naturels dans la même région, un accroissement annuel moyen en diamètre de l'ordre de 3,2 ± 0,4 mm/an. Bourland *et al.* (2012a) rapportent tout de même que ces

résultats sont similaires à ceux signalés par Schmitz (1962), Vangu-Lutete (1974) et Boyemba (2011), notamment 6,8 (11 arbres), 4,5 (101 arbres) et 4,2 ± 1,4 mm/an (422 arbres), respectivement dans la forêt mixte et humide de Yangambi. Hawthorne (1995) rapporte que, entre 1965 et 1973, l'Institut de Recherche sur les produits Forestiers au Ghana avait inclus *P. elata* dans un programme sylvicole des espèces de grande valeur commerciale dans différentes zones à écologie contrastée, notamment à Pra-Anum, Subri et Afram Headwaters. Sept ans après dans le dispositif de Pra-Anum, on a signalé que les individus de *P. elata* avaient une hauteur moyenne de 8 m et un diamètre de 92 mm. Tandis qu'à Afram Headwaters, les arbres âgés de 4 ans mesuraient 1,7 m de haut et 43 mm de diamètre.

Eu égard à son statut d'espèce de lumière, des essais d'enrichissement des trouées d'abattage par des plants de *P. elata* ont été aussi mis en place dans les forêts denses et humides d'Afrique Centrale. Ouédraogo *et al.* (2014) ont mené une expérimentation à l'Est du Cameroun sur un total de 27 trouées d'abattage correspondant à trois unités d'aménagement distinctes. Ces trouées d'abattage dataient de 5 à 12 mois et mesuraient en moyenne 155 m². Les plantules transplantées provenaient d'une pépinière et avaient une hauteur et un diamètre moyen de 59 cm et 6 mm respectivement. L'analyse de la fertilité du sol dans ces trouées d'abattage avait été réalisée dans cet essai. Après cinq années, ils ont obtenu un taux de survie de 61 % des plantules initiales, avec un accroissement annuel moyen en diamètre de 0.28 cm/an sans aucune intervention sylvicole. Ces auteurs pensent donc que *P. elata* est bien adapté pour l'enrichissement en trouées d'abattage. Ouédraogo *et al.* (2014) ont également testé à l'Est du Cameroun les performances de *P. elata* suivant trois approches sylvicoles dans les trouées d'abattage : (i) contrôle sans intervention (ii) éclaircies biannuelles de la végétation compétitive un mètre autour des plants et (iii) éclaircies systématiques biannuelles de toute la végétation compétitive dans la trouée. Ces auteurs ont pu montrer que l'élimination de la compétition rend les plants de *P. elata* plus performants. Par exemple, ils ont signalé pour ce qui est de l'accroissement annuel moyen en diamètre, des valeurs de 2,77 ± 1,36 ; 4,23 ± 2,24 et 8,32 ± 36,05 mm/an respectivement pour les trois traitements.

Fayolle *et al.* (2015) ont mené une autre expérimentation dans la réserve forestière du Dja toujours à l'Est du Cameroun. Cette expérimentation portait sur la performance différentielle de *P. elata* et de *M. excelsa* en trouée d'abattage et en plantation après défrichement. A cet effet, 202 plants de *M. excelsa* (hauteur moyenne de 20 cm) avaient été transplantés en trouées d'abattage et suivis pendant 65 mois et un total de 95 plants de *P. elata* (hauteur moyenne 63 cm) transplanté entre 2007 et 2008 dans les mêmes conditions et suivis pendant 60 mois. La surface considérée par ces auteurs était en moyenne 224 m² et 145 m² pour *M. excelsa* et *P. elata* respectivement. Ces auteurs rapportent un accroissement annuel moyen en hauteur de 45 ± 23 et 86,43 ± 42,96 cm/an, un accroissement annuel en diamètre de 2,79 ± 1,37 et 9,08 ± 4,56 mm/an chez *P. elata* dans les trouées d'abattage et en plantation hors compétition respectivement. Fayolle *et al.* (2015) remarquent dans cette étude que, contrairement à leurs attentes, *P. elata* est plus performant en plantation hors compétition que *M. excelsa*, mais avec un effet opposé en trouée d'abattage sans intervention.

Nous constatons qu'en dehors des essais sylvicoles réalisés à des échelles relativement faibles cette dernière décennie, et en particulier à l'Est du Cameroun, seules des bribes d'informations sont connues quant à la sylviculture et aucune solution crédible (Bourland *et al.*, 2012a) n'est actuellement apportée pour pallier la carence en régénération naturelle de *P. elata*.

1.6.8 Caractéristiques et commercialisation du bois de *P. elata*

Le bois de *P. elata* présente de bonnes propriétés mécaniques. C'est un bois léger à mi-lourd, mi-dur à dur, avec une masse volumique d'environ 700 à 800 kg/m^3 à 12 % d'humidité (Anglaaere, 2008). Ce bois sèche assez lentement, tant naturellement à l'air libre qu'en séchage artificiel. Les risques de fente sont faibles, mais les bois contrefilés ont tendance à se déformer. Son grain est fin et le fil est droit, parfois légèrement contrefilé (Gérard *et al.*, 1998). Selon la norme NF EN 350-1, le bois de *P. elata* se situe dans la classe de durabilité 1-2 car il est considéré comme durable à très durable vis-à-vis des champignons lignivores. Ainsi cette essence est préconisée dans tous les emplois exposés, en cas d'humidification temporaire ou permanente, ou en contact avec le sol (Gérard *et al.*, 1998). Il est aussi considéré comme durable vis à vis des termites (classe de durabilité : D) et des *Lyctus* selon la norme NF EN 350-1. Toutefois, ces qualités sont attribuées au duramen et non à l'aubier qui se distingue par sa couleur jaune-brun pâle.

Le bois de *P. elata* a des utilisations diverses. Il est utilisé en ébénisterie, en décoration et en ameublement, notamment pour la fabrication de parquets, contreplaqués et lambris, mais aussi pour les constructions navales où il a été couramment utilisé pour substituer le Tek (Taylor, 1960).

P. elata (Afromosia) tout comme *Entandrophragma cylindricum* (Sapeli), *Triplochiton scleroxylon* (Ayous) et *Aucoumea klaineana* (Okoumé) fait partie des essences les plus exploitées dans les forêts du Bassin du Congo. En effet, dans les années 1960, le Ghana était le plus grand exportateur d'Afromosia, avec 86 000 m^3 de grumes et 19 600 m^3 de sciages par an, contre seulement 150 m^3 de grumes en 2001 et après c'était le tour de la Côte d'Ivoire vers les années 1966 avec environ 68 000 m^3 de grumes et 15 000 m^3 de sciages par an. Cependant, depuis le début des années 2000, on observe un effet inverse avec des exportations d'Afromosia d'Afrique centrale égales au quadruple de celles d'Afrique de l'Ouest (Anglaaere, 2008). De nos jours, le Cameroun, la RDC et le Congo sont les principaux exportateurs de cette essence, loin devant la Côte d'Ivoire et le Ghana qui n'exporte plus que de faibles volumes (Doucet *et al.*, 2016). Au cours de la période 1993-1998 en RDC, les exportations de *P. elata* ont plafonné à 25 000 m^3 par an. Les exportations officielles ont ensuite fortement diminué pendant la période de la guerre civile et n'ont recommencé à augmenter qu'en 2003 (Dickson *et al.*, 2005). En 2009, la Belgique et la France ont importé environ 60 et 30 % du volume total de bois scié de *P. elata* produit au Cameroun, respectivement. Cependant, la plus grande part des exportations de *P. elata* va en direction de l'Italie (Dickson *et al.*, 2005). Après environ 60 ans d'exploitation forestière, le prix payé pour le bois de *P. elata* est devenu l'un des plus élevés du marché mondial des bois tropicaux (Bourland *et al.*, 2012a).

1.7 INEAC de Yangambi : Quel héritage ?

Les informations de cette section sont tirées des « Rapport annuel » de l'INEAC, exercices 1935-1959.

L'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo belge fut créé par Arrêté Royal le 22 septembre 1933 et installé par S. M. le Roi Léopold III le 24 mars 1934. La création de l'INEAC fut l'œuvre d'ambitions nouvelles plutôt qu'une création nouvelle proprement dite. L'INEAC était en fait le résultat de la reconversion d'une organisation préexistante : la Régie des plantations de la colonie. La création de la Régie des plantions de la colonie en 1926, fut sans doute à cette époque un des tournants majeurs de l'agronomie tropicale ; elle était chargée des études et des expérimentations de cultures industrielles dans certaines stations agricoles de la colonie (Stassart, 2012). Cependant,

l'INEAC venait ainsi donner un nouveau visage de la recherche scientifique et technique en Afrique tropicale. L'INEAC avait pour ambition le développement scientifique de l'agriculture par la recherche, l'étude et l'expérimentation ainsi que la vulgarisation des résultats. Mais, avec une réelle volonté de se rapprocher des préoccupations de l'agriculture traditionnelle en intégrant dans ces activités une composante culture vivrière. La première préoccupation du Comité de direction de l'INEAC fut d'adapter l'organisme ancien à ses nouvelles ambitions : il commença par abandonner les services de la Régie qui ne pouvaient utilement entrer dans son activité, décida de la création de service nouveaux. La transformation fut progressive, mais tout de même très rapide, avec plusieurs milliers de travailleurs dans ses différentes stations.

La direction générale de l'INEAC était à Bruxelles et son siège social à Yangambi. A ce titre, Yangambi disposait de nombreuses infrastructures (bureaux, logements pour chercheurs et employés locaux, bibliothèque, laboratoires modernes etc). Au milieu des années 1950, période de plein essor des activités de l'INEAC, les recherches étaient entreprises dans divers domaines organisés en 21 Divisions parmi lesquelles : les Divisions Palmier à huile, Hévéa, Café et Cacao, Cultures vivrières, Botanique, Phytopathologie et Entomologie agricole, Foresterie, Botanique, Agrologie, Climatologie, Physiologie végétale, Mécanique agricole et Génie rural, Zootechnie, hydrobiologie piscicole etc (Kearsley, 2015). La division forestière fut créée en décembre 1935.

Le vent des indépendances qui souffla en Afrique dans les années 1960 entraîna un ralentissement considérable des activités de recherche dans différentes stations de l'INEAC, voire un abandon dans certains domaines. La quasi-totalité des chercheurs étant des européens, ils abandonnèrent l'INEAC du fait de l'instabilité du pays aux mains d'une poignée de congolais très peu expérimentés et non préparés à recevoir un tel héritage. Néanmoins, après que le Congo ait acquis son indépendance, l'État belge continuait de financer les activités de recherche dans différentes stations de l'INEAC à travers le pays. Mais pas plus tard qu'en 1970, l'INEAC fut complètement rétrocédée à l'État congolais et devenu INERA (Institut Nationale pour l'Etude et la Recherche Agronomique). Depuis lors, l'INERA n'a jamais pu panser les plaies de cette indépendance précoce acquise par le Congo. Aujourd'hui, l'état de délabrement des infrastructures léguées par l'INEAC est flagrant et l'INERA peine à remplir les fonctions qui sont les siennes par manque de moyens financiers et d'expertise requise.



(a) (b)

Figure 1.4 – (a) Bâtiment principal de l'INERA abritant la direction générale et la bibliothèque centrale (b) Bâtiments et installations abandonnés de l'ancienne Division de l'agriculture et de la mécanique agricole de l'INEAC (Yangambi, 18 avril 2018).

Chapitre 2

Matériel et Méthodes

2.1 Zone d'étude et sa localisation

La RDC est un pays d'Afrique Centrale qui se démarque par l'immensité de son territoire. Il s'étend sur une superficie d'environ 2 345 410 km^2 ; c'est d'ailleurs le pays le plus vaste d'Afrique après l'Algérie (2 380 000 km^2) et il partage la frontière avec 9 autres pays [1] (*cf.* figure 2.1).

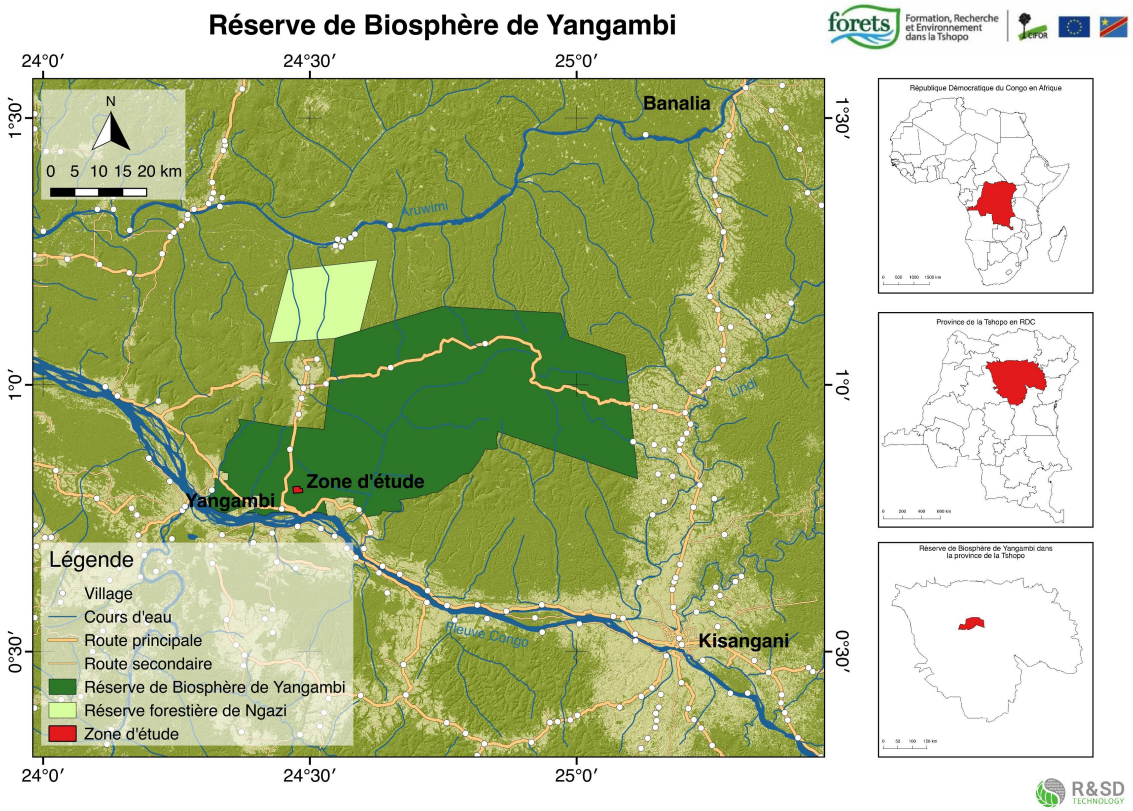


Figure 2.1 – Localisation de la zone d'étude

Les données relatives à la réalisation de cette étude ont été collectées en RDC, plus précisément à Yangambi. Située dans la zone équatoriale à 0° 46' de latitude Nord et à 24° 29' de longitude Est, la « cité » de Yangambi se trouve à une centaine de kilomètres à l'Ouest de la ville de Kisangani, Chef-lieu

1. au Nord par la République Centrafricaine et le Soudan ; à l'Est par l'Ouganda, le Rwanda, le Burundi et la Tanzanie ; au Sud par la Zambie et l'Angola, et à l'Ouest par la République du Congo, l'enclave de Cabinda et l'Océan Atlantique (http://www.congovirtuel.com/geographie.php)

de la Province de Tshopo, ex Province Orientale.

2.2 Milieu physique

2.2.1 Caractéristiques du climat

Selon la classification de Köppen (1928), la région de Yangambi est soumise à un climat de type *Af*, caractéristique des régions où la hauteur mensuelle des pluies du mois le plus sec est > 6 mm (Gilson *et al.*, 1956). Les données reçues à la station météorologique de Yangambi indiquent des précipitations moyennes annuelles de 1845 ± 719 mm (2000-2017). Elles se répartissent en quatre saisons : une grande saison des pluies (d'août à novembre), une saison sèche bien marquée (de décembre à février), une petite saison des pluies (de mars à juin) et une petite saison sèche (juillet) avec une ampleur très variable d'une année à l'autre (Kouadio *et al.*, 2014). Il pleut toute l'année avec deux maxima, l'un en octobre (grande saison des pluies) et l'autre en Avril-mai (petite saison des pluies). Les maxima de sécheresse se situent entre décembre et janvier ; globalement, il pleut une fois tous les deux jours à Yangambi. Cette variabilité de saisons au cours de l'année peut influencer profondément la phénologie et la croissance des espèces forestières telles que *P. elata*. La température moyenne est de 25,4 ± 0,5°C avec des maxima de 33,1 ± 0,7°C et des minima de 19,7 ± 0,3°C (2000-2017). L'humidité relative moyenne annuelle varie entre 77,5 % et 85,2 % (Yendjogi, 2009). L'évolution des précipitations moyennes mensuelles et des températures maximales et minimales mensuelles au cours de la période 2000 - 2017 est représentée dans la figure 2.2 ci-dessous.

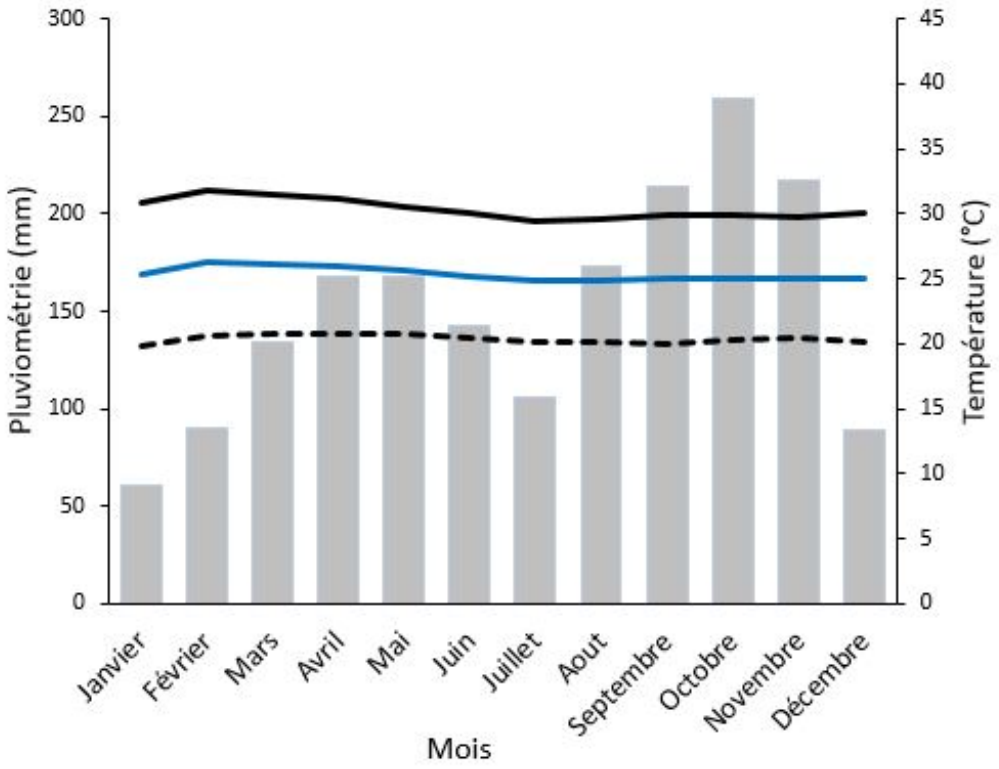


Figure 2.2 – Diagramme ombrothermique (température et pluviométrie) de la région de Yangambi ; ligne pleine noire = températures mensuelles maximales ; ligne pleine bleue = températures mensuelles moyennes ; ligne en pointillé = températures mensuelles minimales (Relevés de température et de pluviométrie/station météorologique de Yangambi, 2000-2017)

2.2.2 Relief et hydrographie

La région de Yangambi est caractérisée par une série de plateaux (plateau Lumumba, Likango, Yangambi et Isalowe), entrecoupés de vallées. Le plateau dont l'altitude moyenne est de 80 m au-dessus du niveau du fleuve, présente une topographie horizontale et subhorizontale avec des pentes qui dépassent rarement 2-3 % (Kearsley, 2015). Selon Gilson *et al.* (1956) et Vangu-Lutete (1974), il s'agit d'une surface d'accumulation des sables éoliens. L'altitude des fonds de vallée varie entre 10 et 20 m au-dessus du niveau moyen du fleuve. La dénivellation entre le plateau et le fond de vallée varie entre 50 et 70 m. Dans les fonds de vallée, les cours d'eau dont les principaux (Bosambila, Isalowe, Mutchang, Lilanda, Bonde et Lobilo) et les affluents, tributaires du fleuve Congo coulent en direction du Sud (Vangu-Lutete, 1974).

2.2.3 Géologie et sols

Le matériel géologique de la RDC est complexe et très ancien ; cette complexité relève de la richesse du sous-sol de ce pays en minéraux précieux. Les différents événements géologiques de la RDC sont subdivisés en deux périodes : les formations du soubassement datant du précambrien et offrant une tectonique assez compliquée (nombre de plis et failles) et des terrains de couverture (terrains phanérozoïques) allant du carbonifère supérieur à l'Holocène (Gilson *et al.*, 1956)

La série sédimentaire de la région de Yangambi est composée de dépôts très hétérogènes, principalement sablonneux à strates subhorizontales ou obliques, déposés dans un bassin de sédimentation lacustre sous un climat aride à semi-aride d'Afrique tropicale. Cette série est recouverte par un banc ferrugineux datant de la fin du tertiaire, qui englobe des matériaux cimentés d'origines diverses (Gilson *et al.*, 1956; Vangu-Lutete, 1974). Elle est uniforme et recouverte par le dépôt éolien, non stratifié des sables ocre-jaune qui masque sa topographie (Ngongo *et al.*, 2009).

Les sols la région de Yangambi font partie de la grande famille des sols issus des dépôts éoliens rencontrés en RDC. Les dépôts de Yangambi sont caractérisés par des sables argileux grossiers jaunes et des argiles sableuses datant du pléistocène moyen (Ngongo *et al.*, 2009). D'après une classification proposée par Jones *et al.* (2015), ces sols appartiennent au type « FRxa » : sols très altérés de teneur faible en nutriments, de couleur jaune.

2.3 Milieu biologique

2.3.1 Typologie des formations végétales

En relation étroite avec les conditions climatiques, topographiques et pédologiques, les plantes peuvent vivre ensemble en formant des « groupements végétaux » (Letouzey, 1982; Stassart, 2012). Une classification des grandes formations végétales d'Afrique intertropicale occidentale et centrale avait été faite à l'issue des accords de Yangambi en 1956 (Letouzey, 1982). Parmi ces formations végétales, deux types principaux (figure 2.3) couvrent la région forestière de Yangambi : les forêts denses humides sur terre ferme et les forêts denses humides sur sols hydromorphes (Boyemba, 2011).

— Les forêts denses humides sur terre ferme

Elles regroupent les forêts sempervirentes et les forêts semi-caducifoliées. Ces deux groupes constituent les deux variantes du stade climacique des forêts denses tropicales humides (Hawthorne, 1995; Boyemba, 2011). Souvent confinée en petites poche en bordure des plateaux ou allongés sur les pentes sableuses aux bord des rivières, les forêts sempervirentes de la région de Yangambi font partie des forêts

ombrophiles sempervirentes, dont la surface terrière dépasse le plus souvent 30 m^2/ha (Stassart, 2012). Ces forêts sont essentiellement monodominantes, avec les espèces de la strate supérieure qui peuvent atteindre jusqu'à 60 mètres de hauteur. *Gilbertiodendron dewevrei* (De Wild.) J. Léonard et *Brachystegia laurentii* (De Wild.) Louis ex J. Léonard sont les deux principales espèces sempervirentes présentes dans la région de Yangambi (Louis, 1943; Boyemba, 2011) ; on y distingue donc les forêts ombrophiles sempervirentes à *Gilbertiodendron dewevrei* et les forêts climaciques à *Brachystegia laurentii*.

La forêt dense semi-décidue quant à elle, est une forêt mixte ou hétérogène, dont la strate supérieure est constituée d'un mélange d'espèces (Boyemba, 2011). Ce type de formation végétale, au stade juvénile, couvre le plus souvent de larges étendues de plateaux. On note une composition floristique assez variable, avec cependant une dominance remarquable de *Scorodophloeus zenkeri* Harms (Gilson *et al.*, 1956). De fortes dominances locales se présentent, les plus importantes étant : *Scorodophloeus zenkeri* Harms, *Cynometra hankei*, *Cynometra alexandri* (Gillet *et al.*, 2016; Boyemba, 2011). D'autres espèces prennent par endroits plus d'importance, ce sont par exemple : *Polyalthia suaveolens*, *Prioria balsamifera*, *Pericopsis elata* et plusieurs espèces de Méliacées, etc (Gilson *et al.*, 1956; Boyemba, 2011). Ce type de forêt constituerait une phase de transition de la forêt secondaire vers la forêt ombrophile sempervirente (Gilson *et al.*, 1956).

— Les forêts denses humides sur sols hydromorphes

Les forêts marécageuses et rivulaires sont caractéristiques des forêts denses humides sur sols hydromorphes. Elles sont principalement situées le long du réseau hydrographique, résultant de la présence des sols hydromorphes des fonds de vallées. L'essentiel de ce type de forêt rencontré dans la région de Yangambi se résume aux forêts marécageuses à *Uapaca heudelotti* et aux peuplements à *Uapaca guineensis* (Boyemba, 2011; Stassart, 2012).

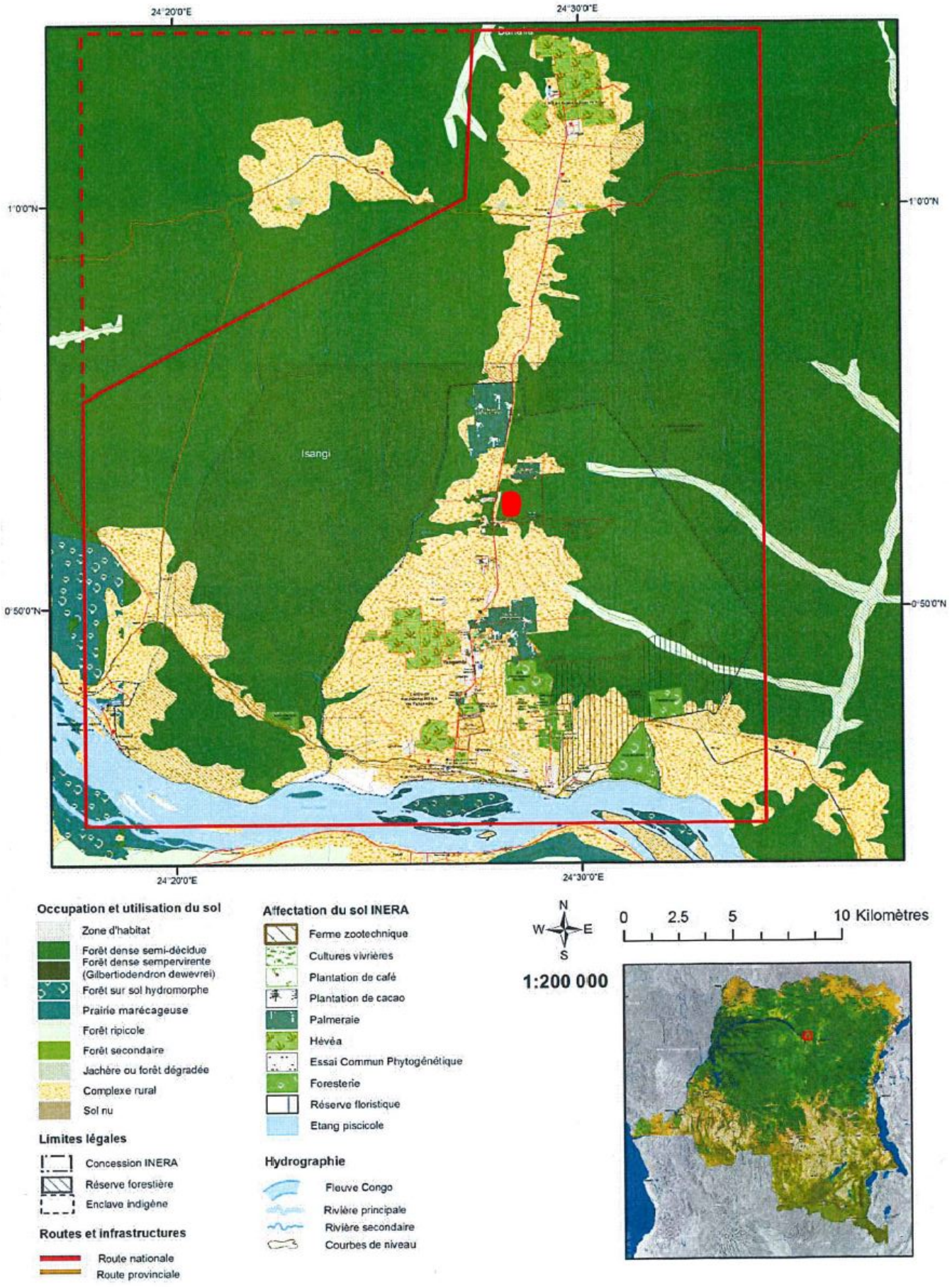


Figure 2.3 – Carte d'occupation et d'utilisation du sol de la région de Yangambi. Source : Stassart (2012). Notre zone d'étude est illustrée par le point rouge sur cette carte. Le cadre rouge pointillé délimite la zone d'étude lors du travail de fin d'études de l'auteur de cette carte et le cadre rouge continu représente la zone qu'il avait réellement couverte sur le terrain.

2.4 Méthodologie de la recherche documentaire

La réalisation d'un mémoire de fin d'étude nécessite une approche méthodologique pertinente et adaptée à la fois à la discipline, au sujet d'étude, à la collecte et l'analyse des données de terrain. Celle-ci passe par une recherche documentaire qui elle aussi répond à une certaine stratégie de recherche.

Dans le cadre de ce travail, nous avons été amenés à consulter plusieurs sources de données, à la fois pour enrichir nos connaissances sur l'autoécologie et la sylviculture de *P. elata* et pour retracer l'historique des aménagements sylvicoles appliqués à cette espèce dans les blocs d'aménagement de Yangambi.

Recherche bibliographique

Beaud (2006) propose deux méthodes qui nous ont semblé pertinentes : la méthode de la « remontée des filières bibliographiques » et la méthode de la « recherche systématique ». Étant donné que ces deux méthodes sont complémentaires, elles sont utilisées parallèlement.

Remontée des filières bibliographiques

Cette méthode est pratiquée systématiquement (Beaud, 2006). En partant des ouvrages, articles scientifiques ou des études les plus récents ou non, relatifs au sujet d'étude, nous étudions leurs bibliographies, leurs sources, les auteurs cités, et nous notons les références de tous les ouvrages, articles et études qui nous paraissent intéressants. À partir de là, nous établissons une « fiche de référence » par titre et on classe notre fiche par ordre alphabétique des noms d'auteurs. On peut également organiser notre fiche par dossier voire sous dossier de façon à s'y retrouver aisément. Cette manière de procéder nous permet donc de compiler très rapidement des références importantes à partir des travaux existants. Dans certains cas, il se produit très rapidement un phénomène de « boule de neige » tel que décrit par Beaud (2006) au travers de la figure ci-dessous.

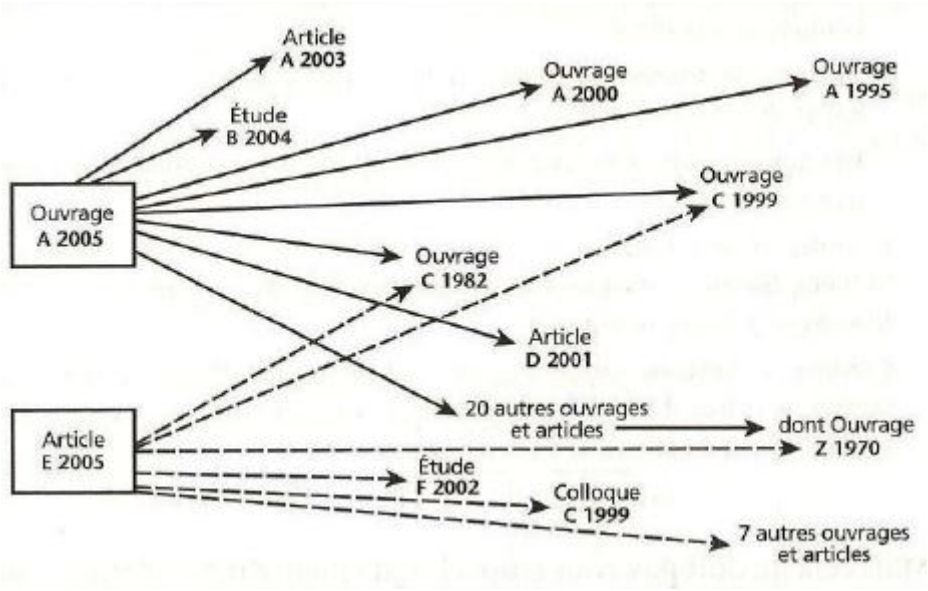


Figure 2.4 – Représentation graphique de la méthode de la remontée des filières bibliographique. Extrait de Beaud (2006)

Selon cet auteur, le travail sur les bibliographies de l'ouvrage de A (figure 2.4) et l'article de E publiés en 2005 pourront nous indiquer par exemple l'existence d'une trentaine d'ouvrages et d'articles

en rapport avec notre sujet. Ils nous amènent à constater que A et C semblent avoir travaillé depuis quelques années sur le sujet ; et de même, tout comme A, E se réfère aux travaux de C et de Z (Beaud, 2006). En procédant ainsi, on compile de façon efficiente les références pertinentes relatives à notre sujet d'étude.

Une fois notre « fiche de référence » constituée nous nous servons soit, des noms d'auteurs et les dates de publication soit des titres pour interroger différents types de bases de données afin de retrouver ces ouvrages et articles. Certains de ces documents peuvent être en accès libre et gratuit en ligne, mais d'autres pas. Dans le cadre de nos recherches, nous avons utilisé le moteur de recherche Google scholar et la base de données de la ressource électronique de l'UCL où la grande majorité des publications sont en accès libre. Nous nous sommes servis de l'application Zotero version 5.0.28 pour la gestion de ces références bibliographiques.

La recherche systématique sur fichier

Cette méthodes consiste à se servir de fichiers de bibliothèques et centres de documentation quelle que soit la forme (tiroir avec fiches en carton, système de microfiches, interrogation des bases de données disponibles en ligne) (Beaud, 2006). Dans le cadre de ce travail nous avons utilisé essentiellement les catalogues/inventaires (disponibles en ligne) des centres de documentation (Archives nationales et Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer) et des bibliothèques de l'UCL et de Gembloux Agro-Bio Tech. Cette démarche nécessite l'usage d'une combinaison ou non des mots-clés bien ciblés et des noms d'auteurs à partir desquels on effectue ces recherches. On peut constater à ce niveau qu'intervient le caractère complémentaire des deux méthodes comme susmentionné. Par ce biais nous avons l'information sur la disponibilité d'ouvrages, d'articles de périodiques, de rapports, d'actes de séminaires ou de thèses en relation avec notre sujet disponibles en ces différents lieux. Les documents renseignés dans ces catalogues/inventaire sont codifiés soit par des numéros d'ordre d'apparition dans le catalogue, soit par un système de codification propre à un centre de recherche ou à une bibliothèque, soit aussi par une cote correspondant à l'emplacement dans la bibliothèque. Procédant ainsi, nous dressons une liste codifiée des références que nous allons pouvoir aller consulter.

Cette méthodologie a été utilisée dans le but de retrouver des documents historiques de la Division forestière de l'INEAC de Yangambi et plus précisément ceux concernant les blocs d'aménagement.

Dans ce cas, les mots-clés et/ou combinaisons de mots-clés suivant ont par exemple été utilisés : Yangambi, INEAC, *Afromosia elata*, *Pericopsis elata*, blocs d'aménagement Yangambi, sylviculture, essais sylvicoles Yangambi, régénération naturelle Yangambi, Division forestière INEAC. Les noms d'auteurs suivant ont aussi été utilisés lors de nos recherches : Gilbert, G ; Donis, A ; Maudaux, E ; Abeels, P ; Pierters, A ; Moyaux, M ; Creat, A et Déville, A. Ces auteurs/chercheurs sont des personnes qui ont occupé des postes de responsabilité à la Division forestière de l'INEAC de Yangambi entre 1935 et 1960.

Choix des bibliothèques et centres de documentation

L'INEAC documentait ses activités au travers d'une série de publications scientifiques et techniques qui étaient très vulgarisés en Belgique. Notamment, le Bulletin Agricole du Congo belge, le Bulletin d'information de l'INEAC, les séries scientifiques et techniques. Mais aussi les rapports annuels qui sont un compte rendu administratif et scientifique donnant une vue d'ensemble de l'évolution historique des activités de l'INEAC. Il était nécessaire dans ce travail de passer en revue toute cette documentation.

Comme susmentionné, ces documents ont été consultés à la bibliothèque de Sciences et Technologies de l'Université catholique de Louvain, à la bibliothèque des sciences agronomiques de Gembloux Agro-Bio Tech, au Musée Royal de l'Afrique Centrale, aux Archives nationales (Bruxelles), à l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer et à la bibliothèque de l'INERA de Yangambi. Les raisons qui ont motivé notre choix pour ces différents lieux et les spécificités de chacun d'eux sont présentées dans l'annexe 1.

2.5 Méthode d'échantillonnage

2.5.1 Présentation des dispositifs de collecte des données

Le parcellaire de la division foresterie de l'INEAC - Yangambi fut délimité entre 1943 et 1946 par les ingénieurs et les techniciens de cette division. Celui-ci était constitué de quatre grands ensembles relatifs aux différentes activités de la division forestière de l'INEAC : des parcelles allouées à la pépinière, des parcelles d'observations, des parcelles d'enrichissements/plantations et les blocs d'aménagement. Au 1er janvier 1947, les blocs d'aménagement étaient constitués de huit blocs allant de A à H et occupant environ 245 ha. Ceux-ci furent plus tard subdivisés en placeaux d'un hectare dédiés à l'expérimentation de la régénération naturelle des essences précieuses, avec *P. elata* comme espèce de base. Ces placeaux au nombre de 53 comprenaient 25 placeaux avec *P. elata*, 12 placeaux avec *Entandrophragma cylindricum* et 16 placeaux avec des essences diverses.

Dans le cadre d'un travail de thèse de doctorat conduit par le Musée Royal d'Afrique Centrale, un dispositif permanent d'étude de *P. elata* avait été installé sur l'ensemble des blocs d'aménagement. Il s'agit de 19 layons dont 15 de 1300 m de long et 60 m de large et 4 de 800 m de long et 60 m de large, orientés vers le Nord (*cf.* figure 2.5). Dans le cadre de ce travail de doctorat, un inventaire forestier ciblant *P. elata* avait été réalisé en 2016 et un numéro marqué à la peinture avait été inscrit sur chaque tige inventoriée. Cette base de données d'inventaire de septembre 2016 a constitué une donnée essentielle dans la réalisation de ce travail.

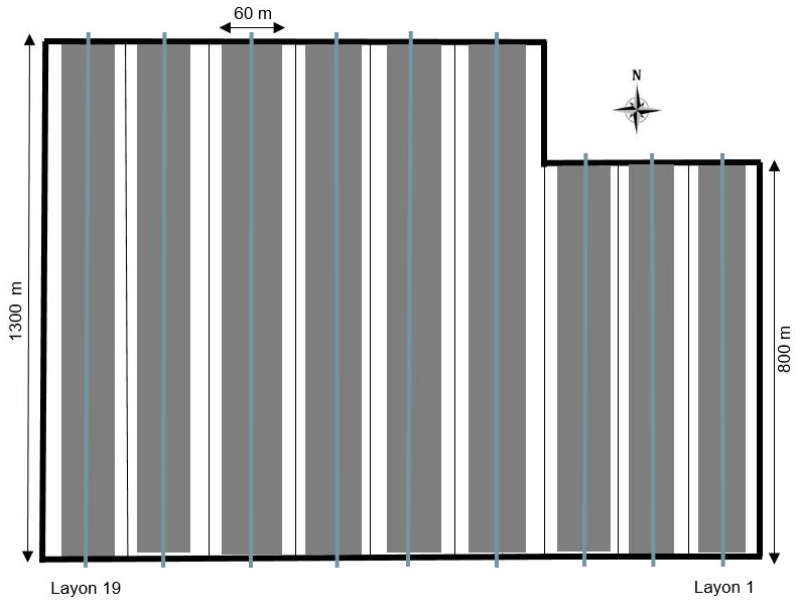


Figure 2.5 – Aperçu schématique du dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement de Yangambi ; les lignes verticales bleues représentent le centre du layon et lignes noires, les limites entre deux layons (100 m de distance inter-layon) ; les bandes grises (de 60 m de large) représentent la surface inventoriée.

Le second dispositif expérimental qui a servi de support à notre étude était constitué de deux circuits de suivi de la dynamique forestière. Ces derniers avaient été installés en octobre 2016 dans les blocs d'aménagement et dans la forêt non-aménagée dans la réserve de biosphère de Yangambi. Ces deux circuits avaient été installés par l'équipe de recherche du laboratoire de biologie du bois du Musée Royal d'Afrique Centrale. Ce type de dispositif repose sur l'analyse d'un nombre déterminé d'individus répartis dans 10 classes de diamètre. Picard et Gourlet-Fleury (2008) recommandent de constituer des échantillons comportant un même nombre d'arbres de l'espèce concernée par classe de diamètre, de manière à équilibrer le nombre d'individus dans chaque classe. Pour une espèce d'arbre donnée, ces auteurs préconisent 20 arbres par classe, soit un effectif de 200 arbres pour l'ensemble du dispositif. Pour ce faire, il suffit de parcourir la forêt en suivant un circuit (*cf.* figure 2.6) prédéfini, et de recenser les tiges saines de l'espèce d'intérêt appartenant à chacune des classes de diamètre. Le circuit est clos lorsqu'on atteint un nombre de 20 arbres par classe de diamètre. Toutefois, compte tenu des exigences écologiques et des interventions dans le milieu ayant un impact fort sur la structure des populations d'une espèce d'intérêt considérée, on peut rencontrer des cas avec moins de 20 arbres par classes de diamètre. Ainsi, pour des raisons liées à l'autoécologie de *P. elata*, le nombre d'arbres par classe de diamètre dans nos dispositifs varie fortement selon qu'on se trouve dans les blocs d'aménagement ou dans la forêt non-aménagée (*cf.* tableau 2.2).

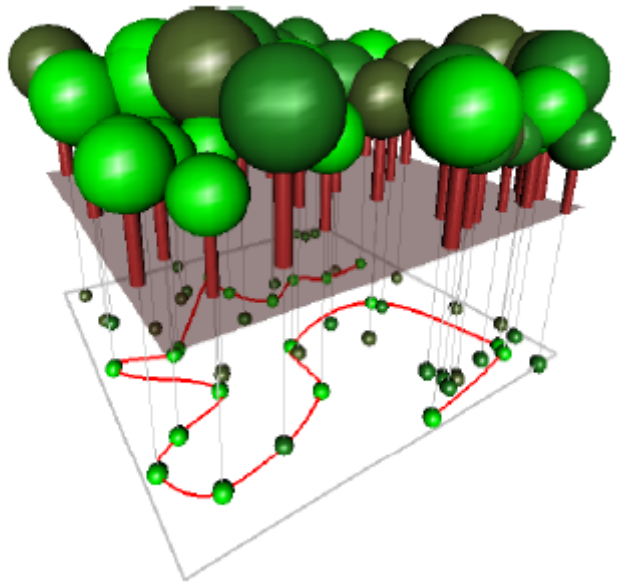


Figure 2.6 – Illustration d'un circuit de suivi de la dynamique forestière en forêt tropicale (Picard et Gourlet-Fleury, 2008).

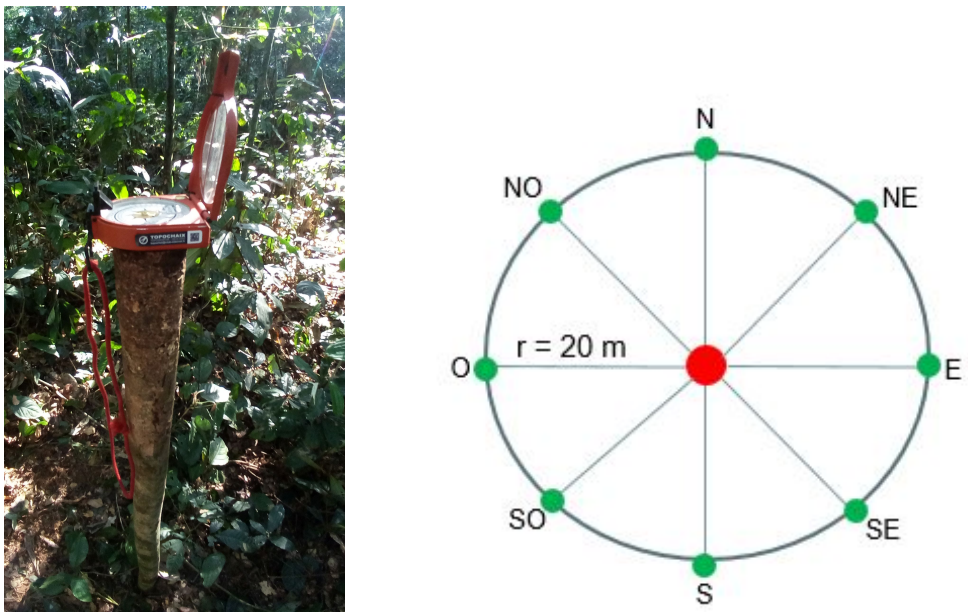
Tableau 2.1 – Récapitulatif des dispositifs expérimentaux et des données disponibles et collectées pour l'étude de *P. elata*.

Site	**Blocs d'aménagement**		**Forêt non-aménagée**
Dispositif de collecte des données	Layon	Placette circulaire (R = 20 m), centrée sur l'arbre cible	Placette circulaire (R = 20 m), centrée sur l'arbre cible
Surface totale inventoriée	136,2 ha	6,5 ha	6,5 ha
Méthode d'échantillonnage	Inventaire systématique par échantillonnage	Semi-aléatoire	Semi-aléatoire
Type de dispositif	Layon	Circuit de suivi de la dynamique forestière	Circuit de suivi de la dynamique forestière
Données préexistantes	dbh (septembre 2016), code de Dawkins, CF, SS, carte des blocs d'aménagement. **Rq** : Nous disposions des données de dbh d'un sous-échantillon datant d'avril 2012 qui nous a permis d'estimer l'accroissement diamétrique sur un pas de temps un peu plus large que notre échantillon principal (source données : laboratoire de biologie du bois - MRAC).	dbh (juin 2016 et octobre 2017), code de Dawkins et CF de tous les arbres du circuit	dbh (mai 2016 et octobre 2017), code de Dawkins, et CF de tous les arbres du circuit. **Rq** : Nous disposions des données de dbh issues d'un inventaire systématique des tiges de *P. elata* effectué en janvier 2017 dans un dispositif en layon. Ces données ont permis de faire une comparaison de la structure des populations du modèle d'étude entre la forêt aménagée et la forêt non-aménagée (*cf.* § 3.3.1) .
Données collectées (février-avril 2018)	dbh, code Dawkins, CF, SS, coordonnées cartésiennes et GPS	Identification des espèces, dbh ($\geqslant$10 cm), et coordonnées polaires (distance au pied-cible, azimut depuis le pied-cible) de tous les ligneux dans le rayon de 20 m autour du pied-cible ; surface de projection du houppier du pied-cible au sol. NB : La placette circulaire est centrée sur un pied de *P. elata*	Identification des espèces, dbh ($\geqslant$10 cm), et coordonnées polaires (distance au pied-cible, azimut depuis le pied-cible) de tous les ligneux dans le rayon de 20 m autour du pied-cible ; surface de projection du houppier du pied-cible au sol. NB : La placette circulaire est centrée sur un pied de *P. elata*

CF = « crown form » (indice de forme de la couronne) ; SS = statut social ; dbh = « diamètre à hauteur de poitrine » (*cf.* § 2.4.2 et 2.5) ; Rq = remarque

2.5.2 Installation des placettes circulaires

Afin d'identifier les variables explicatives à l'origine de la variation de la croissance d'un arbre à l'autre, et de modéliser la croissance en fonction de ces paramètres, des placettes circulaires centrées autour des arbres focaux ont été installées dans deux types d'environnement dans la réserve de biosphère de Yangambi. Ces arbres focaux sont des tiges de *P. elata* faisant partie du circuit de suivi de la dynamique forestière distinctement installé dans les blocs d'aménagement et dans la forêt non-aménagée. Nous référant aux travaux de Fétéké *et al.* (2015), nous avons considéré des placettes circulaires d'inventaire de 20 m de rayon, soit une superficie de 0,13 ha pour chaque placette. Dans les cas où l'arbre focal était penché ou avait une cime dissymétrique, le centre de la placette n'était pas pris au niveau de la souche mais plutôt au niveau du centre de projection de la cime au sol. Ainsi, ces placettes circulaires ont été installées autour de cinq individus tirés au hasard parmi les potentiels 20 que comptent les différentes classes de diamètre dans les deux types de milieux (forêt aménagée et forêt non-aménagée). Une fois l'arbre focal identifié, nous faisons le tour complet de ce dernier dans le sens horaire à l'aide d'une boussole à bulle d'air (Topochaix) placée sur un « pied de Jacob » (figure 2.7 a) et d'un pentadécamètre, et nous installons 8 jalons à 20 mètres suivant les directions cardinales Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest et Nord-Ouest. Toutes les tiges d'espèces ligneuses de $D \geq 10$ cm situées à l'intérieur de cette placette matérialisée par les 8 jalons constituent l'échantillon de caractérisation du voisinage de notre arbre focal. Pour chacune de ces tiges, on procédait à son identification, mesurait son diamètre à 1,30 m de hauteur au niveau du sol et relevait sa coordonnée polaire (distance au pied-cible, azimut depuis le pied-cible). Notons qu'on a observé des cas où il avait chevauchement entre deux placettes circulaires. Dans ce cas, un arbre voisin pouvait se retrouver dans les deux placettes, mais avec des cordonnées polaires différentes.



(a) (b)

Figure 2.7 – (a) Boussole placée sur un « pied de Jacob » (b) Placette circulaire de caractérisation du voisinage de l'arbre focal : le point rouge représente l'arbre focal ; les points verts, les jalons de délimitation de la placette circulaire.

Dans le but d'estimer la surface de projection du houppier des arbres focaux sur le plan horizontal, nous avons mesuré à l'aide d'un pentadécamètre le rayon du houppier de ces derniers suivant les 8 directions cardinales de délimitation des placettes. Le travail a été ainsi effectué dans un total de 100 placettes circulaires, correspondant à 5 arbres pour chacune des 10 classes de diamètre dans les deux types de forêts. Le tableau 2.2 ci-dessous montre la répartition de ces arbres focaux faisant partie du circuit de suivi de la dynamique forestière par classe de diamètre dans les deux environnements.

Tableau 2.2 – Distribution des arbres focaux des deux circuits de suivi de la dynamique forestière par classe de diamètre.

Classe	**N**	**BA**		**FNA**	
		numéro des arbres	$\mathbf{n}_i$	**numéro des arbres**	$\mathbf{n}_i$
[10-20[	5	1, 2, 6, 7, 9	20	12, 138, 162, 164, 177	7
[20-30[	5	5, 8, 12, 17, 18	20	50, 78, 136, 154, 156	12
[30-40[	5	3, 4, 25, 37, 40	19	3, 6, 15, 16, 47	20
[40-50[	5	54, 58, 60, 65, 66	19	5, 6, 15, 16, 47	19
[50-60[	5	36, 53, 70, 81, 107	15	22, 31, 57, 68, 86	22
[60-70[	5	34, 35, 57, 68, 83	20	7, 10, 25, 28, 37	20
[70-80[	5	28, 85, 92, 97, 108	9	18, 23, 25, 28, 37	19
[80-90[	5	50, 64, 67, 86, 95	14	1, 4, 9, 14, 20	20
[90-100[	5	80, 82, 87, 96, 99	9	2, 27, 29, 30, 40	21
≥100	5	29, 71, 89, 98, 124	5	8, 13, 32, 42, 51	20
Totaux		**50**	**150**	**50**	**180**

BA : blocs d'aménagement ; FNA : forêt non-aménagée ; N est l'effectif d'arbres focaux choisis au hasard dans la classe i dans chaque type de forêt, n_i le nombre d'arbres suivis dans la classe i ; le numéro des arbres correspond au numéro de l'arbre focal dans le circuit.

2.6 Mesure des arbres et de leur environnement

2.6.1 Mesure du DBH des arbres

Le dbh est mesuré par convention à 1,30 m au-dessus du niveau du sol en forêt tropicale d'Afrique centrale. Toutefois, pour des individus ayant des défauts et/ou déformations pouvant entraver cette mesure à 1,30 m, il convient d'effectuer la mesure au moins à 50 cm au-dessus de tout défaut et/ou déformation (Kouadio *et al.*, 2014). Mais, plusieurs autres cas de figure peuvent être rencontrés comme le montre la figure 2.8. Dans notre dispositif, pour tous les individus inventoriés en 2016, le niveau de mesure du DBH avait été marqué à la peinture, et c'est à ce même endroit que nous avons à chaque fois pris la mesure. Cependant, dans un souci de limiter au maximum les erreurs de mesure, la zone de mesure a été rigoureusement nettoyée à la brosse pour tous les individus ; afin d'enlever les éventuels écailles et épiphytes qui auraient faussés nos mesures. Dans le même ordre d'idée, ce paramètre a été mesuré par le même opérateur pour l'ensemble des individus rencontrés.

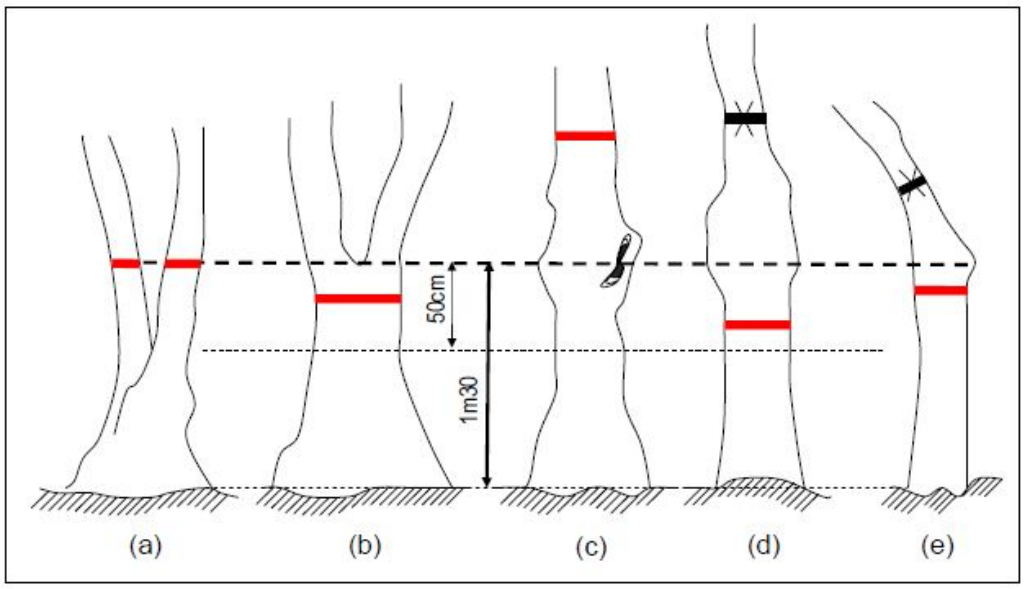


Figure 2.8 – Positionnement du trait de mesure chez les arbres présentant fourches et déformations du tronc. (a) Fourche en-dessous de 1,30 m. (b) Fourche à 1,30 m. (c) Déformation à 1,30 m, le tronc présente des zones cylindriques de circonférence proche en-dessous et au-dessus de la hauteur de référence : on remonte le trait. (d) et (e) Déformations à 1,30 m, le tronc présente des zones cylindriques de circonférence très différente en-dessous et au-dessus de la hauteur de référence : il est préférable de descendre le trait de mesure, dans la limite de 50 cm (Picard et Gourlet-Fleury, 2008).

2.6.2 Statut social des arbres dans la canopée forestière

Le statut social a été estimé pour permettre des évaluations visuelles standardisées de la position des différentes couronnes d'arbres dans la canopée par rapport aux autres arbres du voisinage. Dans le but d'étudier l'influence du statut social des tiges de *P. elata* sur l'accroissement diamétrique, celles-ci ont été classées en quatre catégories dont trois sont représentées dans la figure 2.9 : Prédominant (sont des arbres dont les cimes émergent au-dessus des autres arbres. Ce qui signifie que les cimes reçoivent la lumière sur toutes les faces, même inférieures), Dominant (les arbres dominants sont ceux dont les cimes sont bien développées et se situent dans la partie supérieure du couvert forestier. Ceux-ci reçoivent la lumière par le dessus et par les côtés), Co-dominant (les cimes des arbres Co-dominants sont situées dans le même étage que leurs voisins) et Dominé (les arbres dominés sont situés en-dessous

de la canopée forestière. Elles reçoivent la lumière occasionnellement via des trouées dans le couvert principal).

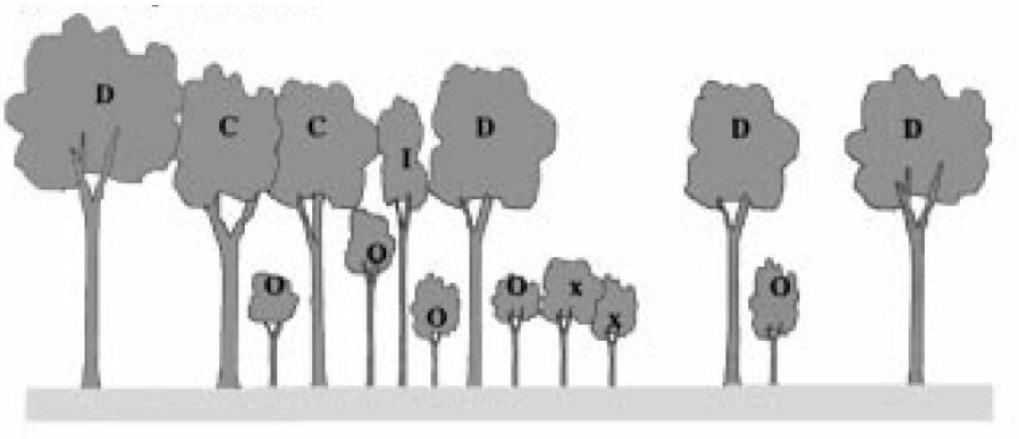


Figure 2.9 – Représentation schématique du statut social des arbres en forêt. D : Dominant (Do), C : Co-dominant (Co), O : Dominé (d) (Jennings *et al.*, 1999).

2.6.3 Code de Dawkins et de Van Daalen

L'indice de Dawkins basé sur la position de la couronne de l'arbre dans la canopée et la proportion de cette dernière exposée à la lumière distingue cinq niveaux (Moravie *et al.*, 1999). Ces différents niveaux sont décrits dans le tableau 2.4 et une représentation schématique en annexe 4.1, figure A.2.

La forme de la couronne d'un arbre caractérise à la fois ses capacités photosynthétiques et sa vigueur (Van Daalen, 1993). L'indice de forme de la couronne proposé par Van Daalen paraît être un indice pertinent permettant d'appréhender l'effet de la compétition sur la croissance de *P. elata* (Van Daalen, 1993). Une description des différents niveaux de cet indice est présentée dans le tableau 2.4 et une représentation schématique en annexe 4.2, figure A.3.

2.7 Paramètres de la dynamique du peuplement

2.7.1 Accroissement en diamètre

Le calcul des accroissements diamétriques repose sur des données de dbh pris à intervalle de temps régulier sur les mêmes individus. Pour ce qui est de notre modèle d'étude, le dbh a été mesuré directement à l'aide d'un ruban diamétrique (*cf.* § 2.6.1). Cependant, les mesures n'ayant pas été faites de façon systématique à la même date chaque année, elles ont été rapportées à une croissance annuelle. Les données de dbh utilisées sont celles de septembre 2016 et février 2018 pour ce qui est du dispositif en layon dans les blocs d'aménagement de Yangambi. Dans le second dispositif constitué des deux circuits de suivi de la dynamique forestière, les mesures sont celles de mai 2016 et d'octobre 2017. Pour chaque individu et chaque période de mesure, l'accroissement est calculé de la manière suivante : Δdbh = [(dbh$_{final}$ - dbh$_{initial}$)/nombre de jours] * 365. Avec Δdbh, dbh$_{final}$ et dbh$_{initial}$ en cm (Zuhaidi, 2006). Il est à noter que les individus inventoriés présentant des défauts particuliers (cicatrices, fente, tronc non cylindrique, écorcés par les villageois) au niveau du trait de mesure ou encore ceux avec une tête cassée ou morts n'ont pas été considérés pour le calcul des accroissements. Par contre, nous avons pris en compte les individus présentant des accroissements nuls et ceux avec de faibles accroissements négatifs (de l'ordre de 0,1 à 0,2 cm/an), le plus souvent dû, soit à une erreur de mesure, soit à un rétrécissement accompagnant la saison sèche ou à un début de dessèchement. Pour ce faire, nous nous sommes référés aux travaux de Gourlet-Fleury et Houllier (2000) et de Zuhaidi (2006).

2.7.2 Mortalité naturelle annualisée

Les arbres morts ont été relevés en même temps que le dbh lors de l'inventaire dans le dispositif en layon. Le taux de mortalité, tout comme le taux de recrutement et de croissance sont des paramètres de dynamique du peuplement (Picard et Gourlet-Fleury, 2008) qui méritent qu'on y prête une attention particulière lorsqu'on travaille dans un dispositif permanent. En effet, il est important, non seulement de bien noter les arbres morts, mais aussi de distinguer entre différents types de mortalité (mort sur pied, chablis simple, chablis complexe) (Picard et Gourlet-Fleury, 2008). La mortalité a été calculée de la manière suivante : On définit Ni l'effectif initial du peuplement, Ns et Nr respectivement le nombre de survivants et le nombre de recrutés après une période d'observation t et Nf = Ns + Nr le nombre total d'individus observés à la fin de la période t. Ainsi, on pose aussi Nm = Ni - Ns le nombre de morts durant la période t (Madelaine-Antin, 2009). Tout comme l'accroissement diamétrique, la mortalité a été annualisée suivant la formule : ΔNm = [(Ni - Ns)/ t] * 365. Avec t correspondant au nombre de jours qui sépare l'observation initiale datant de septembre 2016 à la dernière observation datant de février 2018.

2.8 Structure du peuplement

2.8.1 Structure diamétrique

Les paramètres utilisés pour établir la structure diamétrique de *P. elata* dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement à Yangambi sont, le nombre d'individus inventorié et les classes de diamètre.

2.8.2 Densité et surface terrière

La densité d'une espèce est le nombre d'individus de cette espèce à l'hectare. Elle est évaluée par la formule $N = \frac{n}{S}$, avec N = densité (en tiges.ha^{-1}), n = nombre de tiges présentes sur la surface considérée, S= surface considérée (ha) (Zuhaidi, 2006).

La surface terrière de chaque individu a été obtenue en utilisant la formule suivante : $g_i = \frac{d^2\pi}{40000}$, avec g_i = surface terrière individuelle (m²) ; d = diamètre de l'arbre (cm). La surface terrière par hectare a été par la suite obtenue en appliquant la formule ci-contre : $G = \left(\frac{\sum g_i}{A}\right)$, avec G = surface terrière (m^2.ha^{-1}) et A la surface totale inventoriée (ha).

2.8.3 Dominance, Abondance et Fréquence relative des espèces

La dominance relative est l'importance d'une espèce en terme de surface terrière. Elle s'exprime en ratio de la somme des sections transversales à 1,30 m du sol de tous les arbres d'une espèce donnée (g_i), sur la somme des sections transversales de tous les individus échantillonnés multiplié par cent ; $DR = \frac{\sum g_i}{G}100$.

L'abondance relative exprime l'importance d'une espèce du point de vue de ses effectifs. Elle s'exprime en ratio du nombre d'individus (N_i) de l'espèce i sur le nombre total (N) d'individus échantillonnés multiplié par cent ; $AR = \frac{N_i}{N}100$.

La fréquence relative s'exprime en ratio du nombre de placettes où l'espèce i est présente sur le nombre total de placettes multiplié par cent ; $FR = \frac{P_i}{P}100$. Ces différentes grandeurs nous permettront de caractériser l'environnement de *P. elata* en terme d'espèces accompagnatrices au travers des placettes circulaires en forêt aménagée et non-aménagée.

2.9 Analyses statistiques et modélisation

Les résultats de ce travail sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques. Les tests statistiques et certains graphiques ont été réalisés sous la version 3.4.1 du logiciel R (R Foundation for Statistical Computing, 2017). D'autres graphiques ont été réalisés sous le logiciel Excel (Microsoft Excel, 2016).

2.9.1 Tests statistiques

Dans un premier temps, pour comparer deux moyennes entre elles, nous avons réalisé des tests de t de Student ; un exemple dans ce travail est la comparaison de l'accroissement moyen annuel entre les arbres du circuit de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée et ceux du même circuit en forêt non-aménagée.

Dans un second temps, pour pouvoir différencier plusieurs moyennes entre elles, nous avons appliqué des tests d'analyse de la variance (ANOVA). Ce test nous a par exemple permis de vérifier s'il existe une différence significative de l'accroissement moyen annuel périodique entre les différentes classes de diamètre chez *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi. Nous avons par la suite accompagné les tests ANOVA par un test de Tukey pour comparer des groupes de moyennes deux à deux.

Les différents tests ont été réalisés au seuil de significativité de 0,05 %. De ce fait, on trouvera dans le présent travail la *P-valeur* représentée par la lettre *p*. Cette probabilité de se tromper en rejetant l'hypothèse nulle sera représentée par un ou plusieurs signes * à droite de sa valeur : *** pour une

probabilité hautement significative ($p < 0,001$) ; ** pour une probabilité très significative ($p < 0,01$) et * pour une probabilité significative ($p < 0,05$).

2.9.2 Modèle de croissance

Les modèles de croissance de type « potentiel x réducteur » sont des modèles classiques utilisés par différents auteurs notamment, Gourlet-Fleury et Houllier (2000); Canham *et al.* (2004); Zuhaidi (2006) et Obiang *et al.* (2012).

Concernant la composante « potentiel » du modèle ou modèle diamétrique, une formulation générale dérivée de la fonction log-normale est le plus souvent employée. Mais sa forme varie sensiblement suivant les auteurs, par exemple : $A_{pot} = G\exp\{-[\frac{1}{Y}\ln(\frac{K}{D})]^2\}$ (Obiang *et al.*, 2012) ; $P_{ot}RG = MaxRG\exp\{\frac{-1}{2}(\frac{\ln(DBH/X_0)}{X_b})^2\}$ (Canham *et al.*, 2004). Dans ces deux équations, G = MaxRG et correspond à l'accroissement maximal de l'espèce d'intérêt, K = X_0 représente le diamètre moyen (en cm) des individus présentant l'accroissement maximal observé et Y = X_b, est un paramètre déterminant l'amplitude de la fonction.

Pour ce qui est de la composante « réducteur » du modèle, les indices de compétition fréquemment utilisés se rapportent à la densité des arbres voisins, à la surface terrière et/ou à la distance des voisins à l'arbre cible (*cf.* tableaux 2.3 et 2.4). Dans ces cas, on va parler de modèle individuel ou de modèle dépendant de la distance (Gourlet-Fleury, 1997; Moravie *et al.*, 1999; Gourlet-Fleury et Houllier, 2000). Cependant d'autres indices qualitatifs de compétition mesurant soit, l'exposition de la cime de l'arbre cible à la lumière, soit décrivant la forme de sa couronne ou encore la position de cette dernière dans la canopée forestière sont aussi employés (*cf.* tableau 2.4).

Dans le cadre de ce travail, nous avons identifié une formulation générale d'un modèle de croissance diamétrique proposée par Fétéké *et al.* (2015) qui nous semble pertinente pour modéliser la croissance diamétrique de *P. elata* : $AM_{est} = k1\exp\{-[k2\ln(\frac{k3}{D})]^2 - k4 * X\}$. Dans cette équation, AM_{est} est l'accroissement annuel moyen périodique ; k1, k2, k3 et k4 correspondent aux paramètres du modèle à ajuster. k1 est l'accroissement maximal (en cm.an^{-1}) des arbres considérés, k2 un paramètre de forme de la courbe de croissance, k3 le diamètre moyen (en cm) des arbres présentant l'accroissement maximal et k4 un paramètre qui dirige l'influence de la variable X. D est le diamètre des arbres et X une variable de compétition. Dans cette équation, on pourrait imaginer que l'impact de la compétition des arbres voisins sur l'arbre-cible dépende fortement de sa taille. Le arbres de faible diamètre pourraient alors avoir un impact plus marqué de la compétition du voisinage que les arbres de dimension plus grande. Cela pourrait avoir une forte influence sur la qualité du modèle ajusté. Pour annuler cet effet, on va exprimer le paramètre k4 en fonction d'un paramètre k5 suivant la formule : k4 = $k4'(D)^{k5}$.

Etapes de mise en oeuvre des modèles

Notre démarche a consisté en trois étapes : (i) on a commencé par écrire la fonction du modèle de référence décrit ci-dessus dans le logiciel R ; (ii) par la suite, nous avons déterminé les valeurs initiales des paramètres k1, k2, k3 et k4 du modèle non-linéaire en approximant par le modèle linéaire $\ln Y = a + b\ln D + c(\ln D)^2$ (où $k1 = \exp\big(a + (k2^2)(\log(k3))^2\big)$, $k2 = -c^2$, $k3 = \exp\big(b/(2k2^2)\big)$, $k4 = 0$ (Obiang *et al.*, 2012), *cf.* annexe 7.1), la valeur initiale du paramètre k5 a été tirée aléatoirement entre [-1,1] par le logiciel ; (iii) nous avons enfin ajusté différents modèles de plus en plus complexes en fonction du type de données et des dispositifs en forêt aménagée et non-aménagée à l'aide du package *nlme* (modèles linéaires ou non linéaires à effets mixtes) de la fonction *gnls* (Generalized Nonlinear

Least Squares) dans R (Obiang *et al.*, 2012). L'ajustement de ces modèles en fonction du type de données et de dispositifs dans les deux types de forêts s'est fait selon le raisonnement suivant :

Dans un premier temps, on a émis l'hypothèse selon laquelle le type de forêt n'a pas d'effet sur la croissance diamétrique de *P. elata*. Pour ce faire, nous avons combiné les données du dispositif en placettes circulaires de la forêt aménagée et non-aménagée. Par la suite, on a ajusté les modèles M1a (avec le dbh comme seule variable explicative), M2a (avec une variable exprimant l'intensité de la compétition en plus) et M3a (avec le paramètre k5 en plus) à ce jeu de données.

Dans un second temps, on a considéré que le type de forêt pouvait bien avoir un impact sur la variabilité des accroissements diamétriques chez *P. elata*. Pour cette raison nous avons ajusté les modèles M1b, M2b et M3b aux données du dispositif en placettes circulaires des deux types de forêts distinctement.

Enfin, dans un troisième temps nous avons ajusté des modèles plus généraux M1c, M2c et M3c au jeu de données plus grand du dispositif en layon des blocs d'aménagement. Dans ce dernier cas, nous ne disposons que des indices de Dawkins et de Van Daalen pour apprécier l'effet de la compétition contrairement aux cas précédents.

La performance de ces modèles ajustés a été évaluée grâce aux critères statiques généralement utilisés (Moravie *et al.*, 1999; Gourlet-Fleury et Houllier, 2000; Obiang *et al.*, 2012; Fétéké *et al.*, 2015) : le critère d'information d'Akaike (AIC), l'écart-type résiduel (ECTr), le coefficient de détermination ajusté (R^2adj), l'analyse visuelle de la distribution des résidus et la statistique p (*p-valeur*) du test du rapport de vraisemblance entre les modèles M1 plus simples et les modèles M2 et M3 plus complexes.

2.9.3 Indices de compétition

Les tableaux 2.3 et 2.4 qui suivent présentent de potentiels indices de compétition pouvant permettre d'élaborer des modèles de croissance pour notre modèle d'étude.

Tableau 2.3 – Liste des indices décrivant l'intensité de la compétition au voisinage de l'arbre focal dans les circuits de suivi de la dynamique forestière.

Indice	Définition	Réf
N_{ha}	Nombre d'arbres voisins dans un rayon de 20 m autour de l'arbre focal (tiges/ha) : $N_{ha} = \frac{n}{s}$	(1)
N_{sup}	Nombre d'arbres voisins de diamètre égal au supérieur à l'arbre focal (tiges/ha) : $N_{sup} = \frac{n_B}{s}$	(1)
N_{rel}	Densité relative des arbres voisins de diamètre supérieur ou égal à l'arbre focal (ratio) : $N_{rel} = \frac{n_B}{n}$	(1)
G_{ha}	Somme des surfaces terrières des arbres voisins (m^2/ha) : $G_{ha} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\pi}{4} d_i^2 / s$	(1)
G_{dist}	Somme des surfaces terrières des arbres voisins pondérées par la distance les séparant de l'arbre focal (m/ha) : $G_{dist} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{g_i}{dist_i} / s \right)$	(1)
G_{sup}	Surface terrière des arbres voisins de diamètre supérieur ou égal à l'arbre focal (m^2/ha) : $G_{sup} = \sum_{i=1}^{n_B} \frac{\pi}{4} d_i^2 / s$	(1)
G_{rel}	Surface terrière relative des arbres voisins de diamètre supérieur ou égal à celui de l'arbre focal (ratio) : $G_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^{n_B} \frac{\pi}{4} d_i^2}{\frac{\pi}{4} d_i^2}$	(2)
S_{d_i}	Somme des diamètres des arbres voisins : $S_{d_i} = \sum_{i=1}^{n} d_i$	(2)
$S_{d_i.dist}$	Somme des diamètres des arbres voisins pondérés par la distance les séparant de l'arbre focal (ratio) : $S_{d_i.dist} = \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{dist_i}$	(2)
S_{dsup}	Somme des diamètres des arbres voisins de diamètre supérieur au égal à celui de l'arbre focal : $S_{dsup} = \sum_{i=1}^{n_B} d_i$	(2)
$S_{dsup.d_f}$	Rapport entre la somme des diamètres des arbres voisins de diamètre supérieur au égal à celui de l'arbre focal et le diamètre de l'arbre focal (ratio) : $S_{dsup.d_f} = \frac{S_{dsup}}{d_f}$	(2)
S_p	Surface de projection du houppier de l'arbre focal au sol (m^2) : $S_p = \sum_{i=1}^{8} \frac{ab\,sin(45°)}{2}$	(3)
IC_1	Somme des rapports entre le diamètre de l'arbre focal et le diamètre multiplié par la distance de chaque arbre voisin : $IC_1 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d_f}{(d_i.dist_i)} \right)$	(6)
IC_2	Rapport entre le diamètre de l'arbre focal et le diamètre moyen des arbres voisins (ratio) : $IC_2 = \frac{d_f}{d_{i.moy}}$	

d_i et g_i sont respectivement le diamètre et la surface terrière de chaque arbre i des n arbres inventoriés dans la placette de surface s et n_B est le nombre d'arbres de diamètre plus grand ou égal à celui de l'arbre focal de diamètre d_f ; a et b sont deux côtés de chacun des 8 triangles formés par la projection du houppier de l'arbre focal au sol (*cf.* figure 2.7 b § 2.4.2). Les références correspondent à : (1) Fétéké *et al.* (2015), (2) Moravie *et al.* (1999), (6) Maleki *et al.* (2015), (3) https://www.mathopenref.com/trianglearea sas.html

Tableau 2.4 – Indices qualitatifs de description de l'intensité de la compétition dans le dispositif en layon des blocs d'aménagements de Yangambi.

Indice	Définition	Réf
Daw	**Exposition de la cime de l'arbre focal à la lumière** 4 = Daw1 : la cime ne reçoit pas la lumière directe, seulement de la lumière diffuse ; 3 = Daw2 : cime exposée latéralement à de la lumière directe ; 2 = Daw3 : cime partiellement exposée verticalement ; 1 = Daw4 : cime totalement exposée verticalement mais adjacente à d'autres cimes d'arbres voisins ; 0 = Daw5 : cime d'arbre émergent, entièrement exposée verticalement et latéralement.	(4, 1)
CF	**Indice de forme de la couronne de *P. elata*** 4 = CF1 : couronne dégénérée ou gravement endommagée et incapable de répondre en cas d'ouverture du couvert ; 3 = CF2 : dépérissement assez prononcé, asymétrie prononcée et peu de branches ; 2 = CF3 : distinctement asymétrique, mais reprise potentielle en cas d'exposition à la lumière ; 1 = CF4 : couronne avec un léger défaut de symétrie ou quelques branches mortes ; 0 = CF5 : couronne large, circulaire sur le plan horizontal et symétrique.	(5)

Daw est l'indice de Dawkins (1958), CF (« Crown Form ») l'indice de Van Daalen. Les références correspondent à : (1) Fétéké *et al.* (2015), (4) Madelaine-Antin (2009), (5) Van Daalen (1993).

Parmi les indices de compétition définis ci-dessus, certains pourraient mieux expliquer la variabilité des accroissements chez *P. elata* que d'autres. Afin de pouvoir sélectionner les indices qui expliqueraient au mieux cette variabilité nous avons réalisé une Analyse en Composante Principale (ACP) qui nous a permis de quantifier les différentes corrélations entre ces indices dans les deux types de forêts (*cf.* annexe A.7). On a couplé à cette ACP, une analyse visuelle des graphiques de distribution des résidus du modèle de croissance le plus simple (M1a) en fonction des différents indices de compétition (*cf.* annexe A.8). Ces deux outils nous ont permis de retenir trois indices de compétition (Gha, IC2 et Nsup) pour l'ajustement des modèles (M2 et M3) aux données collectées dans les circuits de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée et non-aménagée. Les indices de Dawkins et de Van Daalen ne concernent que les modèles (M2 et M3) à ajuster aux données du dispositif en layon des blocs d'aménagement.

Chapitre 3

Résultats

La méthodologie qui a été décrite dans le chapitre précèdent nous a permis d'aboutir aux résultats que nous exposons dans le présent chapitre.

Dans un premier temps, nous allons décrire quelques-unes des approches sylvicoles qui ont été appliquées à *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi ; accompagnées d'une carte historique. Dans un second temps, nous allons caractériser les deux milieux d'étude (forêt aménagée et non-aménagée) en terme de structure des populations de *P. elata*, et en terme d'espèces accompagnatrices de cette dernière. Dans un troisième temps, nous caractérisons l'échantillon de *P. elata* inventorié dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement. Dans un quatrième temps, nous faisons une analyse de deux paramètres de la dynamique forestière considérés dans le présent travail. Enfin, le cinquième point sera consacré aux différents modèles de croissance de *P. elata* ajustés aux données en forêt aménagée, non-aménagée et dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement.

3.1 Eléments historiques des traitements sylvicoles appliqués à *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi

Les premières expérimentations sylvicoles réalisées dans la réserve de biosphère de Yangambi remontent à environ 70 ans. Les blocs d'aménagement de Yangambi furent le premier dispositif permanent d'expérimentation sylvicole installé au Congo. Les travaux d'aménagement (travaux sylvicoles) y furent entamés en 1947 par les chercheurs de la division forestière de l'INEAC. Ces aménagements sylvicoles avaient pour but de stimuler la régénération naturelle des principales essences forestières de la région de Yangambi. *P. elata* était l'espèce la plus importante concernée par ces aménagements.

Différents chercheurs de la Division forestière de l'INEAC sont intervenus dans ces travaux d'aménagement entre 1947 et 1956, date des dernières interventions. Celles-ci ont consisté en l'application de différentes approches sylvicoles, avec quelques disparités d'une espèce à l'autre, mais aussi d'un auteur à l'autre.

Les recherches documentaires, l'exploitation de la carte (*cf.* figure 3.1, décrivant schématiquement les méthodes sylvicoles appliquées à différentes périodes dans les blocs d'aménagement) et les observations de terrain montrent que les aménagements concernant *P. elata* ont consisté en trois principales approches sylvicoles décrites ci-dessous.

3.1.1 Dégagement en bande

Une première approche consistait en un dégagement en bande de 25 x 10 m différemment orienté autour du semencier et accompagné ou non de houage. Il s'agit ici d'un couloir de régénération ouvert en abattant des arbres à partir de la souche du semencier. Cette opération était réalisée dans des parcelles d'un hectare correspondant aux découpages observables sur la carte de la figure 3.1. Cette approche fut initiée en 1947 et poursuivie jusqu'en 1956. Ici, on procédait à l'élimination complète de toute végétation (herbacée, lianeuse, arbustive et arborescente) présente sur toute la longueur de la bande de 25 x 10 m. Les opérations menées les années suivant l'installation des bandes se limitaient aux soins d'entretien. Certains semenciers autour desquels cette approche a été appliquée sont bien identifiables sur le terrain.

3.1.2 Dégagements circulaires autour du semencier

Une seconde approche identifiée consistait en un dégagement circulaire dans un rayon de 25 m autour du semencier. Cette modalité était aussi accompagnée ou non de houage. Concrètement, il s'agissait d'un simple dégagement par élimination de toutes les tiges ligneuses présentes même d'espèces précieuses ayant un diamètre inférieur à dix centimètres. Les gousses de *P. elata* étant des planeurs lourds (« heavy glider »), cette approche sylvicole visait vraisemblablement à se conformer à cette caractéristique de l'espèce pour augmenter son potentiel de régénération par voie naturelle. Il est cependant difficile d'identifier sur la carte ou sur le terrain les parcelles où cette approche fut appliquée.

3.1.3 Traitement par groupes de régénération naturelle

La troisième méthode sylvicole est celle qui fut initiée par Pierters en 1956 et serait d'après nos observations de terrain, celle qui a été la plus efficace. Il s'agit ici d'un traitement par groupe de régénération naturelle de *P. elata*. Cette approche avait pour objectif d'étudier l'évolution en nombre et la croissance en hauteur des semis naturels de l'espèce dans un environnement forestier modifié par des éclaircies.

1. Organisation

   Se référant aux expériences antérieures, deux intensités d'ouverture de la canopée forestière furent à la base de l'approche de Pieters. Pour ces deux intensités d'ouverture de la canopée (I_1 et I_2), les traitements débutèrent par l'élimination des lianes et de toutes les espèces sans intérêt économique jusqu'à 10 cm de diamètre. Les herbacées étaient également éliminées.

   — Intensité 1 (I_1)

   I_1 a consisté en l'élimination de tous les arbres dominants, de façon à ramener la hauteur de la canopée forestière entre 15 et 20 m. Le but ici était d'obtenir un couvert homogène avec un éclairement modéré par rapport à l'intensité (I_1).

   — Intensité 2 (I_2)

   I_2 fut caractérisée par l'élimination de tous les arbres dominants et co-dominants. Cette intervention avait pour but de créer des petites trouées dans la canopée forestière, afin d'obtenir un niveau d'éclairement relativement élevé.

2. Mise en œuvre

   — Choix des groupes de régénération

Après une prospection effectuée dans les blocs d'aménagement en Mars 1956, 25 groupes de régénération avaient été mis en place sur une surface totale d'environ 7,6 ha. Le nombre, la localisation, la forme et la surface des groupes de régénération furent principalement déterminés par la distribution spatiale des semenciers, la quantité de gousses matures produites et la proportion de graines germées.

— Dégagement et ouverture de la canopée

Pour des raisons d'ordre pratique, cette opération a été exécutée en trois étapes : *(1)* libération des groupes de régénération par élimination des herbacées, des arbustes et même les végétaux rampants ; *(2)* éclaircie de faible intensité : (i) élimination des lianes par des coupes successives, une au ras du sol et l'autre à 1 m de haut pour prévenir la formation des rejets, (ii) élimination de toutes les espèces indésirables ayant jusqu'à 10 cm de diamètre, (iii) élimination de toutes les tiges malades et/ou déformées d'essences précieuses de $D \leq 10$ cm ; *(3)* ouverture de la canopée conformément aux deux intensités I_1 et I_2 par empoisonnement des tiges de toutes les espèces indésirables à l'arsénite de soude ou par annelation. La technique d'empoisonnement avait pour but de faire disparaître les arbres indésirables le plus rapidement possible. La dangerosité de l'arsénite pour la santé humaine/animale et pour l'environnement fait que cette méthode d'élimination des arbres indésirables ne peut plus être appliquée de nos jours.

Les groupes de régénération naturelle des traitements I_1 et I_2 furent aléatoirement distribués sur toute l'étendue des blocs d'aménagement. Mais, les auteurs étaient parfois amenés à prendre en compte le degré de fermeture du couvert existant.

Des 25 groupes de régénération, 12 ont été concernés pour le traitement I_1 sur une surface totale d'environ 4,4 ha, tandis que les 13 restant ont été concernés par le traitement I_2 sur une surface totale d'environ 3,2 ha. Pieters (1994) rapporte que lors de ces traitements, les plus beaux individus des essences de valeur avaient été conservés. Pour le reste, les éclaircies avaient été réalisées à la même période dans le but d'optimiser financièrement les produits récoltés. Il est aussi rapporté que pour le traitement I_1, environ 139 arbres/ha avaient été empoisonnés, contre environ 233 arbres/ha pour le traitement I_2.

— Technique d'échantillonnage

Pour chacun des deux groupes de régénération I_1 et I_2, deux placeaux avaient été aléatoirement choisis pour les comptages et les différentes mensurations. Ces placeaux furent orientés Est-Ouest, avec une largeur de 2 m, la longueur dépendait des dimensions et de la forme du groupe de régénération d'origine. Chacun de ces placeaux fut par la suite divisé en unité d'inventaire de 2x5 m. La surface couverte par ces placeaux dans chacun des groupes de régénération I_1 et I_2 était respectivement 2.198,5 m^2 et 1.557,5 m^2.

— Mesures et observations

Dans les placeaux retenus, des comptages périodiques et des mesures de hauteur des plantules étaient effectués tous les mois durant la première année, tous les trois mois au cours de la seconde année et par après, tous les 6 mois. (Pieters, 1994) note que ces observations et mensurations ne concernaient pas que les plantules de *P. elata* bien que ce sont elles qui étaient visées.

Des observations sur l'état sanitaire, la fermeture du couvert et la recolonisation de la forêt étaient régulièrement effectuées ; l'insolation était mesurée ; mais aussi les coûts d'installation

et d'entretien étaient régulièrement tenus à jour.

Les soins d'entretien apportés tous les ans aux placeaux avaient pour but d'obtenir une recolonisation du milieu le plus rapidement possible. Ainsi, toute la végétation ligneuse qui ne constituait pas un obstacle direct pour le développement des plantules de *P. elata* était conservée.

3. Périodicité des opérations

   Chute des gousses matures et germination : Février et Mars 1956

   Dégagement des groupes de régénération : du 04 avril au 02 juin 1956

   Faible intensité d'éclaircie : du 27 juin au 04 juillet 1956

   Ouverture de la canopée par empoisonnement des arbres : du 10 au 24 juillet 1956

3.2 Cartographie historique des travaux sylvicoles dans les blocs d'aménagement de Yangambi couplée à l'état de l'art actuel

Dans le but d'apprécier l'impact éventuel des différentes approches sylvicoles appliquées à *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi, nous avons superposé les individus de l'échantillon inventoriés sur l'ancienne carte des blocs d'aménagement acquise à la Division forestière de l'INERA de Yangambi. La carte a été scannée et par la suite géoréférencée avec l'appui de la société R&SD *Technology*. La figure 3.1 ci-après présente le résultat de cette superposition et la figure 3.2 montre un agrandissement partiel de cette dernière.

La première information que l'on peut tirer de cette carte (figure 3.1) sont ces agrégats que l'on observe sur ou à proximité des parcelles « Ole ». « Ole » est le nom vernaculaire de *P. elata* en langue locale de Yangambi (*cf.* 3.1 et 3.2).

Une deuxième information est qu'un nombre relativement important d'agrégats de *P. elata* se retrouve dans/ou à proximité des parcelles où c'est plutôt *Entandrophragma cylindricum* (« Esaka » en langue locale de Yangambi) qui était l'espèce visée par l'intervention. Ce résultat est bien visible sur le terrain où il est intéressant de constater qu'il n'y a pas ou peu de régénération d'*E. cylindricum* sous ou à proximité de ces gros semenciers, contrairement à celle de *P. elata*.

Une troisième information importante à noter est que, pour la majorité des agrégats observés, le scientifique responsable mentionné est Pieters et l'année des travaux, 1956, ce qui pourrait correspondre avec l'une des méthodes sylvicoles décrites au § 3.1. Remarquons aussi que l'on observe sur cette carte que les essais sylvicoles initiés par d'autres auteurs concernant notre modèle d'étude avant 1956 n'ont visiblement pas été couronnés de succès ; et dans nombres de cas, les semenciers autour desquels ces travaux furent initiés sont encore identifiables. C'est le cas par exemple de « Gilbert, 1948 ; 1948 », et de « Maudoux, 1952 ; 1954 » comme observable sur la carte (*cf.* figure 3.1).

On doit tout de même remarquer que ce résultat est assez contrasté par rapport aux principales approches sylvicoles qu'on a pu décrire précédemment (*cf.* § 3.1). Les agrégats observés bien que tombant dans/ou à proximité d'une parcelle « Ole », ne correspondent pas toujours à la même méthode sylvicole comme on peut le lire sur la carte (*cf.* figures 3.1 et 3.2).

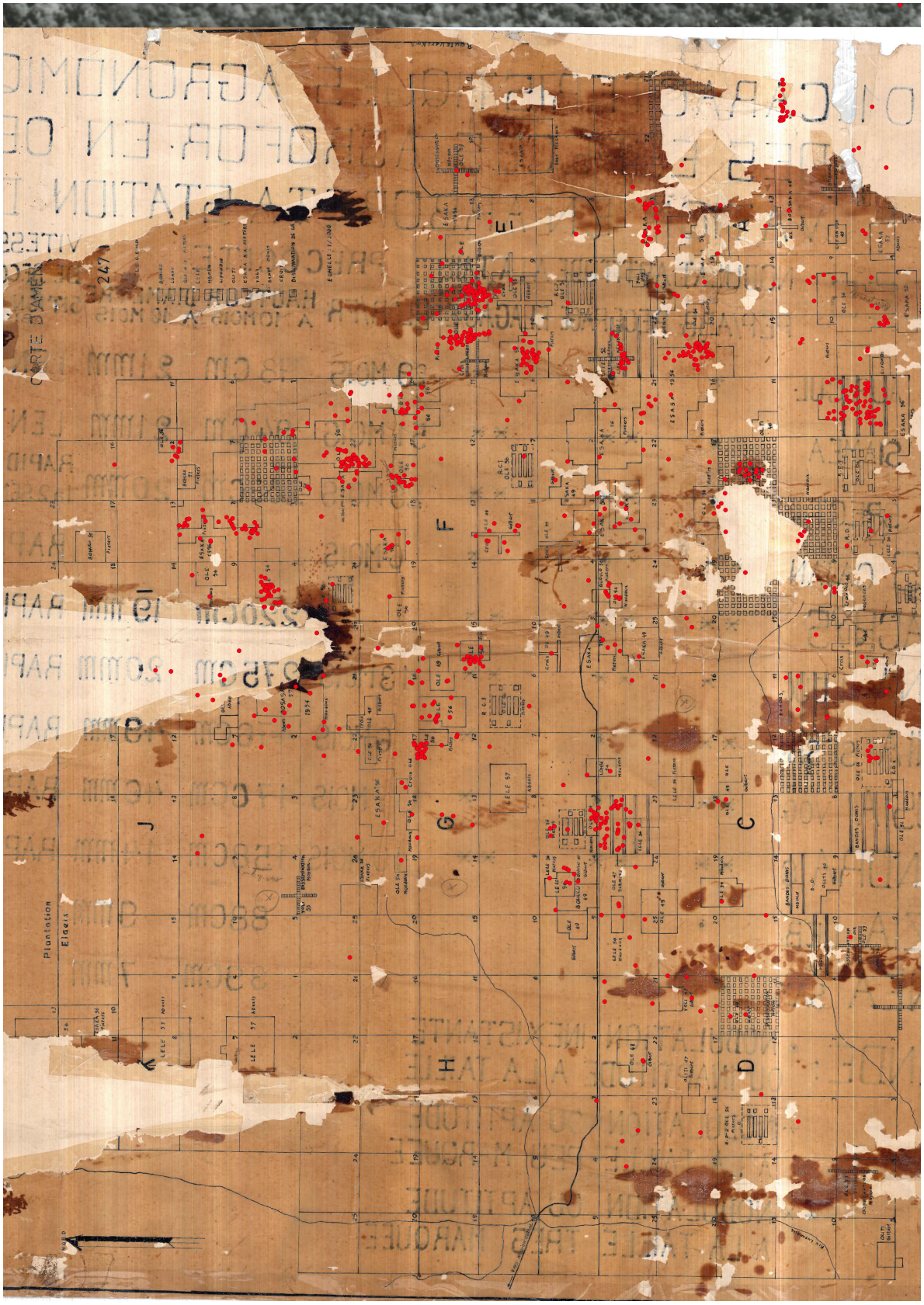


Figure 3.1 – Distribution spatiale des individus échantillonnés superposée à la carte des blocs d'aménagement. Les points rouges correspondent à toutes les tiges de *P. elata* inventoriées en février 2018 dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement de Yangambi.

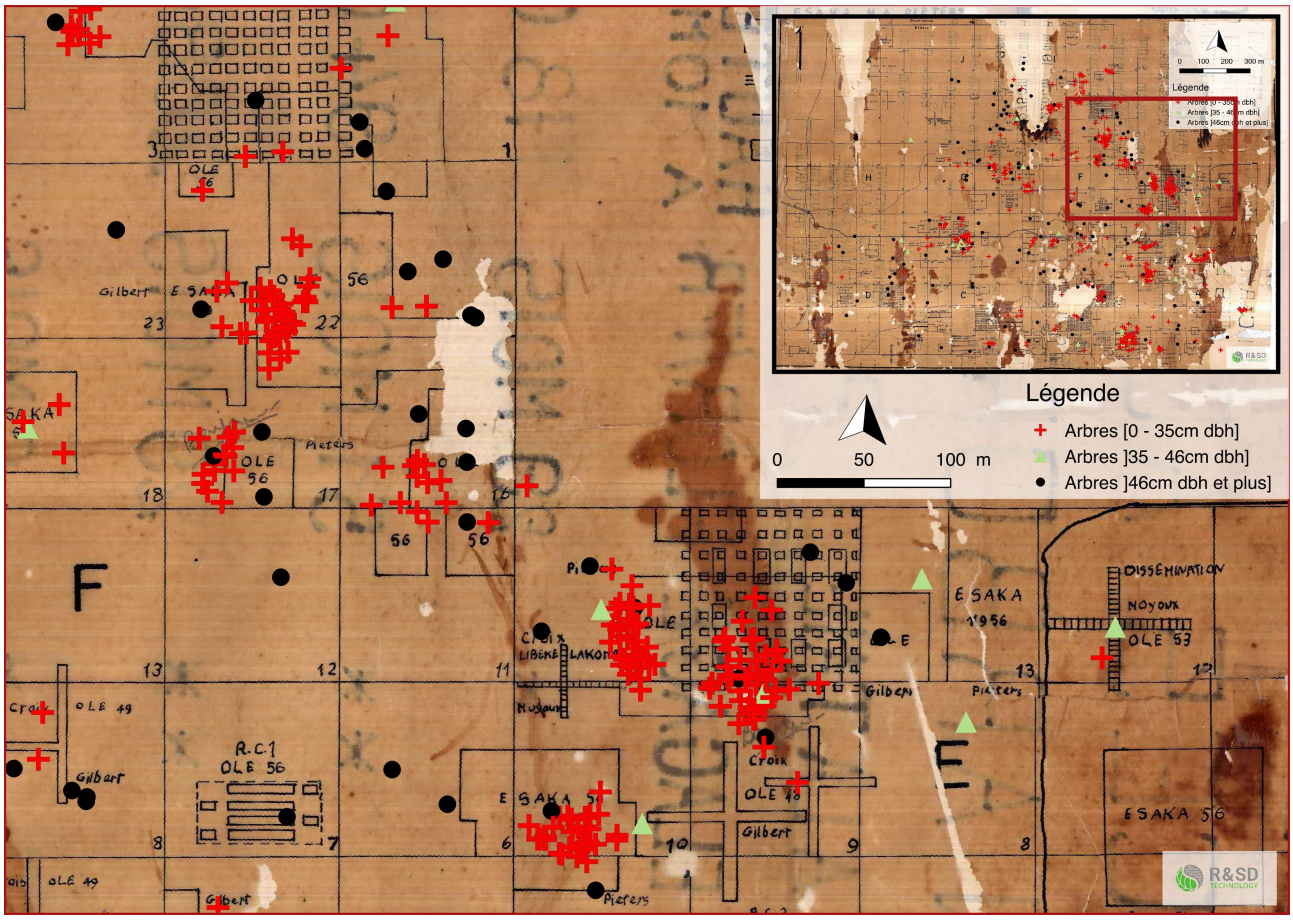


Figure 3.2 – Vue partielle de la distribution spatiale des individus échantillonnés superposée à la carte des blocs d'aménagement.

3.3 Caractéristique structurale des milieux d'étude

3.3.1 Structure des populations du modèle d'étude

La figure 3.3 présente la structure des populations de *P. elata* en forêt aménagée (données d'inventaire de février 2018 dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement) et en forêt non-aménagée (données d'inventaire de janvier 2017 suivant un dispositif en layon). On note une nette différence dans l'évolution des populations dans les deux environnements.

En forêt aménagée, l'évolution de la courbe des populations montre un pic (environ 55%) dans la classe de diamètre [10-20[, témoignant une abondance d'individus de faibles diamètres dans le milieu. A partir de cette classe de diamètre, le nombre d'individus décroît considérablement, mais avec un nombre assez important d'individus dans la deuxième et la troisième classe (environ 10 %), et une faible représentativité dans le reste des classes (moins de 10 %).

Dans la forêt non-aménagée, on observe une structure à tendance bimodale ; avec un déficit d'individus de faibles et de très gros diamètres très prononcé. Cependant, on note une augmentation des effectifs d'une classe de diamètre à l'autre au fur et à mesure qu'on évolue vers les classes de diamètre élevées, avec un premier pic (environ 15 %) dans la classe [70-80[, puis une légère diminution d'effectifs dans la classe suivante. Le second pic (environ 15 %) est observé entre les classes de diamètre [90-100[et [100-110[. Il est suivi par la décroissance des effectifs jusqu'au niveau le plus faible (environ 2 %).

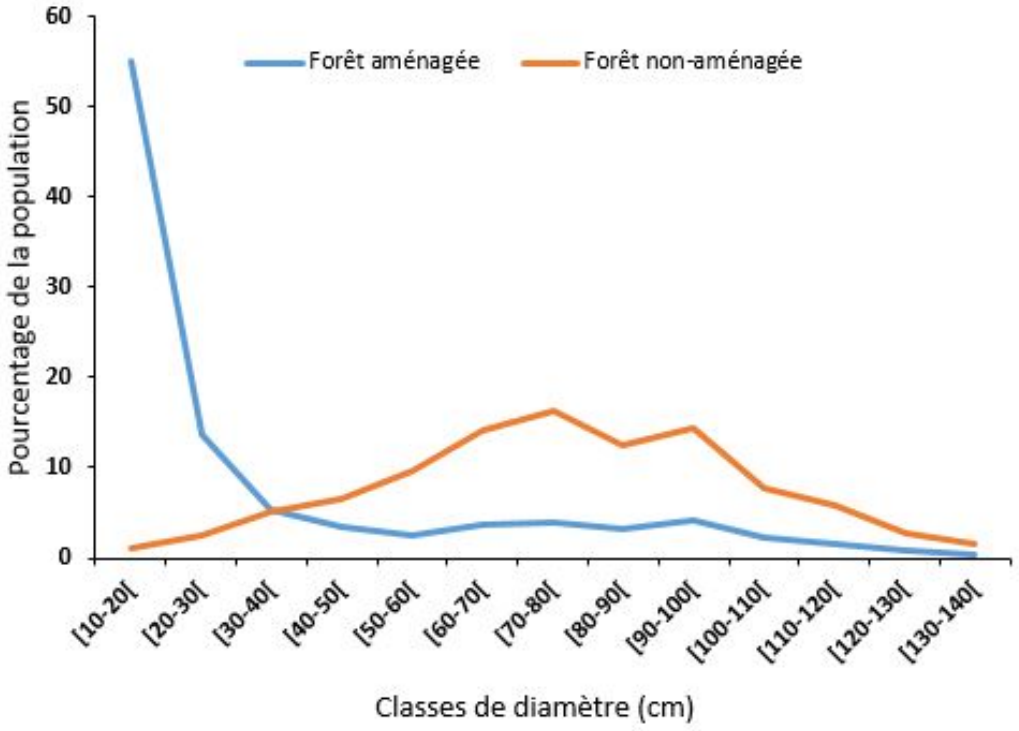


Figure 3.3 – Distribution des individus de *P. elata* en fonction des classes de diamètre en forêt aménagée et non-aménagée. Les données qui ont permis d'obtenir cette distributions sont issues de l'inventaire de février 2018 dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement et d'un inventaire réalisé en janvier 2017 suivant un dispositif en layon dans la forêt non-aménagée de Yangambi.

3.3.2 Espèces accompagnatrices du modèle d'étude en forêt aménagée et non-aménagée

Sur l'ensemble des 50 placettes circulaires couvrant une surface totale de 6,5 ha installées autour des arbres focaux dans le circuit de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée, 2819 individus (433,7 tiges/ha) de 139 espèces différentes ont été inventoriés. Dans le même dispositif en forêt non-aménagée, 2713 individus de 129 espèces différentes ont été inventoriés sur 6.5 ha, soit 417,3 tiges/ha.

Le tableau 3.1 ci-après présente les dix espèces les plus fréquentes, les plus abondantes et les plus dominantes dans la forêt aménagée et la forêt non-aménagée de la réserve de biosphère de Yangambi. Ces paramètres calculés à partir des inventaires faits dans les placettes circulaires ne prennent pas en compte les arbres focaux.

Les données de fréquence relative montrent que dans la forêt aménagée, les espèces les plus fréquentes sont : *Staudtia kamerunensis*, *Scorodophloeus zenkeri*, *Petersianthus macrocarpus* et *Turraeanthus africana*. *P. elata* est la onzième espèce la plus fréquente dans ce milieu, soit une fréquence relative de 66 %. Tandis que dans la forêt non-aménagée les espèces les plus rencontrées sont *Grossera multinervis*, *S. kamerunensis*, *Garcinia epunctata*, *Pancovia harmsiana* et *Trilepisium madagascarensis* (tableau 3.1).

En terme d'abondance relative, les espèces les plus abondantes en forêt aménagée sont : *P. elata* avec 55,2 tiges/ha, soit 12,7 % de l'effectif, *S. zenkeri* avec 30 tiges/ha, soit 9,6 % de l'effectif et la troisième position, *S. kamerunensis* avec 28,2 tiges/ha représentant 6,5 % de l'effectif. Dans la forêt non-aménagée, l'espèce la plus abondante est *G. multinervis* avec 63 tiges/ha, soit 15,1 % de l'effectif ; elle est suivie par *S. zenkeri* et *S. kamerunensis* avec respectivement 34 tiges/ha et 22,2 tiges/ha, soit respectivement 8,1 % et 5,3 % des effectifs.

En ce qui concerne la dominance relative, on note que les espèces les plus importantes en terme de surface terrière dans la forêt aménagée sont : *S. zenkeri* (10,1 %), *T. madagascarensis* (7,9 %) et *Pe. elata* (7,6 %). Dans la forêt, non-aménagée, *S. zenkeri* (11,1 %), *Tridesmostemun omphalocarpoides* (2,7 %) et *P. macrocarpus* (2,6 %) sont les plus importantes en terme de surface terrière totale.

Tableau 3.1 – Fréquence relative (FR), abondance relative (AR) et dominance relative (DR) des espèces d'arbres inventoriées en mars et avril 2018 dans le voisinage des arbres-cibles en forêt aménagée et non-aménagée.

Espèces	**Type d'environnement**					
	Forêt aménagée			**Forêt non-aménagée**		
	DR (%)	AR (%)	FR (%)	DR (%)	AR (%)	FR (%)
Anonidium mannii	1,4	0,8	28	1,9	2,0	60
Celtis tessmannii	2,2	2,6	72	1,0	1,4	48
Chrysophyllum lacourtianum	2,8	0,9	32	1,9	1,3	50
Cola griseiflora	0,4	0,7	8	0,5	3,0	58
Cynometra honkei	0,0	1,0	2	2,6	0,8	26
Entandrophragma cylindricum	3,6	0,6	30	0,1	0,1	4
Garcinia epunctata	0,4	1,0	36	0,8	3,0	**80**
Grossera multinervis	0,7	5,3	74	4,1	**15,1**	**96**
Lepleae thompsonii	0,6	3,2	80	1,3	2,2	58
Pancovia harmsiana	0,1	1,5	36	0,8	4,4	80
Panda oleosa	0,5	1,2	44	1,6	2,4	66
Pericopsis elata	**7,6**	**12,7**	66	2,3	0,6	22
Petersianthus macrocarpus	4,5	3,7	**84**	**2,6**	3,4	74
Piptadeniastrum africanum	2,7	0,8	28	0,2	0,2	8
Polyalthia suaveolens	0,5	1,8	50	1,8	3,8	76
Quassia undulata	0,3	2,3	72	0,0	0,1	6
Scorodophloeus zenkeri	**10,1**	**6,9**	**84**	**11,1**	**8,1**	70
Staudtia kamerunensis	4,9	**6,5**	**94**	1,6	**5,3**	**88**
Strombosia tetandra	2,5	1,2	44	1,8	1,8	62
Tridesmostemone omphalocarpoides	4,4	3,4	70	**2,7**	4,2	80
Trilepisium madagascarensis	**7,9**	3,5	72	0,5	4,2	14
Turraeanthus africana	5,7	4,5	84	1,1	1,7	66

FR est le ratio du nombre de placettes où l'espèce i est présente sur le nombre total de placettes multiplié par 100 ; AR, le ratio du nombre N_i de l'espèce i sur le nombre total N d'individus inventoriés multiplié par 100 ; et DR le ratio de la somme des surfaces terrières de l'espèce i sur la surface terrière totale de toutes les espèces inventoriées ; les chiffres en *Gras* représentent les trois premières valeurs les plus élevées de Fréquence relative, abondance relative et dominance relative.

3.4 Caractérisation de l'échantillon : Dispositif en layon des blocs d'aménagement

Les éléments de structure ci-dessous nous ont semblé adéquats pour caractériser l'échantillon de *P. elata* inventorié dans les blocs d'aménagement plus de 70 ans après les premières interventions.

3.4.1 Distribution spatiale des arbres échantillonnés

La carte de la distribution spatiale des individus échantillonnés dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement de Yangambi est présentée dans la figure 3.4 ci-dessous. On observe sur cette carte l'existence de plusieurs agrégats dans la population échantillonnée, surtout chez la catégorie d'arbres appartenant à l'intervalle [10-20 cm[(croix rouges). Relevons que cette catégorie que nous qualifions de semis ici est bien distincte des plantules/juvéniles qui sont par convention des individus de D $<$ 10 cm. Cette catégorie est visiblement très abondante. Les jeunes arbres (triangles verts) sont des pieds qui ont déjà atteint pour la majorité, le diamètre de fructification (37 cm selon (Bourland, 2013), mais qui sont commercialement non exploitables. Les semenciers ici sont des individus qui, non seulement disséminent déjà depuis plusieurs années, mais qui ont déjà atteint le DME qui est de 60 cm en RDC. On note une distribution spatiale assez homogène de cette catégorie d'individus dans notre échantillon. On constate néanmoins une absence remarquable de tiges de toute catégorie à l'Ouest et au Nord-Ouest du dispositif.

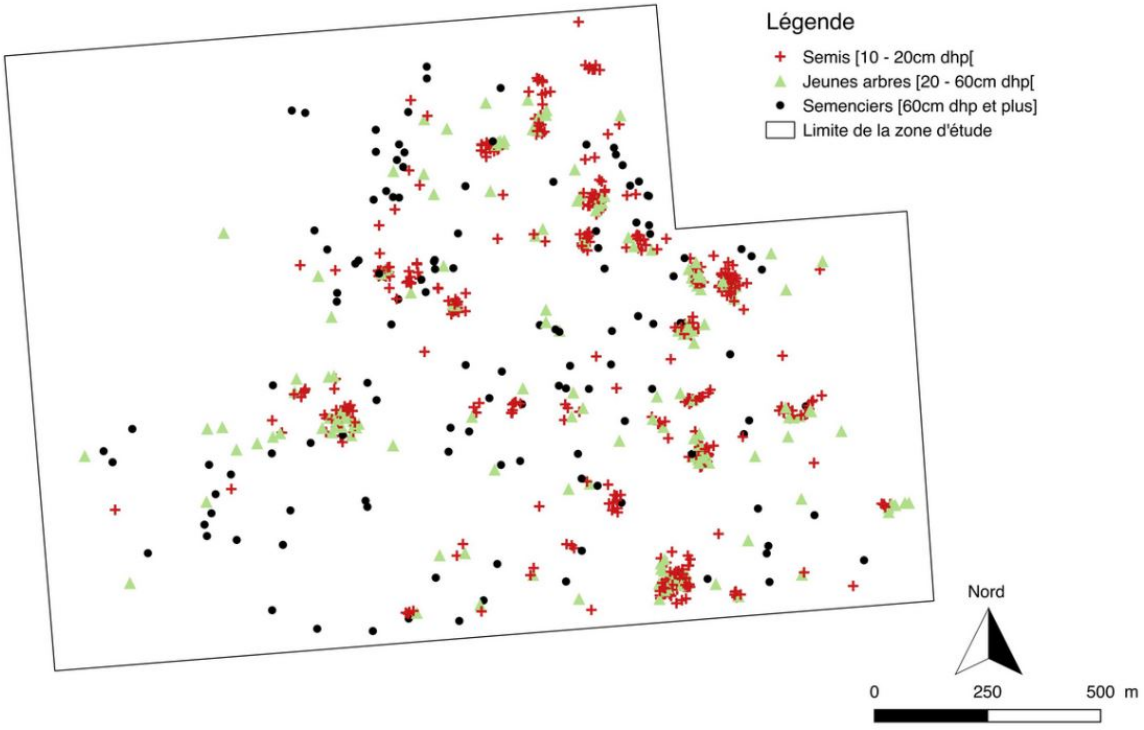


Figure 3.4 – Aperçu de la distribution spatiale des tiges de *P. elata* de D $\geq$ 10 cm inventoriées dans les blocs d'aménagement de Yangambi.

3.4.2 Densité et surface terrière

Sur l'ensemble des 245 ha que comptent les blocs d'aménagement de Yangambi, un inventaire des tiges de *P. elata* a été effectué suivant un échantillonnage systématique sur environ 136,2 ha entre

novembre et décembre 2016 et en février 2018. Au cours de l'inventaire de 2016, un total de 855 tiges de *P. elata* avait été recensé. Lors du second passage en inventaire en février 2018, un total de 878 tiges a été inventorié. Au cours de cet inventaire de 2018, nous avons recensé quelques tiges de plus de 10 cm de diamètre oubliées en 2016 et aussi quelques recrûs. C'est ce qui explique la différence du nombre de tiges inventoriés entre les deux passages. L'inventaire de 2018 nous a donné une densité de 6,4 tiges de *P. elata* à l'hectare ; soit un surface terrière totale occupée de 0,9 m^2/ha.

3.4.3 Répartition des tiges de *P. elata* par classes de diamètre

La figure 3.5 ci-dessous présente la structure diamétrique des tiges de *P. elata* inventoriées dans les blocs d'aménagement. Environ 55% des tiges inventoriées se trouvent dans la classe de diamètre [10-20[, soit environ 3,4 tiges/ha. La classe de diamètre [20-30[contient quant à elle environ 15 % des individus inventoriés, soit sensiblement 1 tige/ha. Par ailleurs, on observe que le nombre de tiges rencontré par hectare est plus ou moins homogène dans le reste des classes. Cette distribution diamétrique des individus présente une forme de « L », caractéristique des peuplements avec un déficit d'individus moyens et des gros individus, mais avec une prédominance des petits.

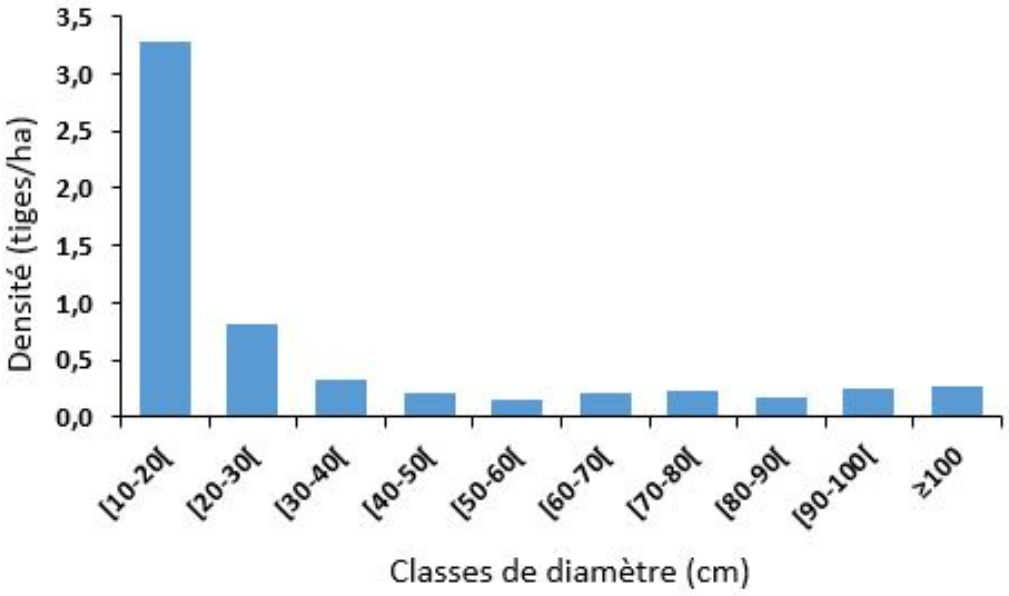


Figure 3.5 – Distribution par classes de diamètre des tiges de *P. elata* inventoriées dans les blocs d'aménagement de Yangambi.

3.5 Paramètres de la dynamique forestière

3.5.1 Accroissement moyen annuel périodique chez *P. elata*

— **Distribution des accroissements moyens annuels périodiques en diamètre en fonction du diamètre initial**

La figure 3.6 ci-dessous nous montre la relation entre les accroissements moyens annuels périodiques en diamètre et le diamètre initial. On observe une distribution un peu plus régulière d'accroissements chez les arbres de faibles diamètres jusqu'à environ 0,6 cm/an. On enregistre peu d'individus de cette catégorie ayant atteint au cours de la période d'étude un accroissement au-delà de 0,6 cm/an. On peut aussi observer que la quasi-totalité des individus qui avaient un diamètre entre]40-63] n'ont pas

enregistré d'accroissements nuls au cours de cette période. On y note par contre des accroissements assez importants chez cette catégorie d'individus. Pour le reste, on observe une très grande variabilité des accroissements entre les individus de même diamètre.

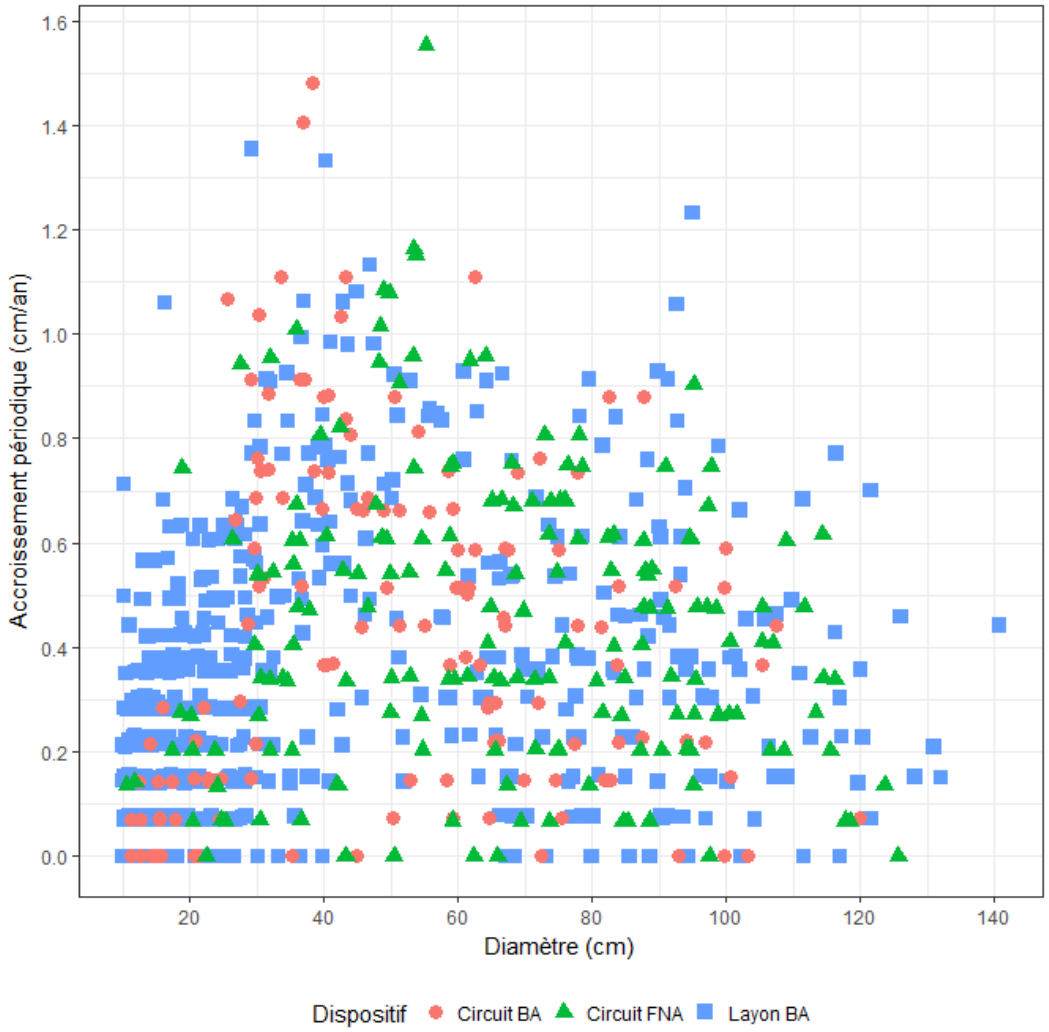


Figure 3.6 – Distribution des accroissements diamétriques annuels moyens (en cm/an) en fonction du diamètre initial (en cm) chez *P. elata* dans le dispositif en layon des blocs d'aménagement (Layon BA), dans le circuit de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée (Circuit BA) et non-aménagée (Circuit FNA) à Yangambi. Les accroissements observés dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement de Yangambi correspondent à la période de septembre 2016 à février 2018, tandis que ceux des deux circuits correspondent à la période de mai et juin 2016 à octobre 2017.

— **Distribution des accroissements moyens annuels périodiques en fonction des classes de diamètre**

La figure 3.7 ci-dessous nous donne une idée de l'évolution des accroissements annuels périodiques de *P. elata* en fonction des classes de diamètre. La classe de diamètre [10-20[constituée essentiellement des individus de faibles diamètres se trouve être la classe dans laquelle on enregistre les accroissements les plus faibles, soit en moyenne 0,13 ± 0,01 cm/an. Cette observation est encore plus marquée lorsqu'on observe l'accroissement moyen périodique de la surface terrière dans cette classe (*cf.* figure A.5). L'accroissement moyen annuel en G observé dans la classe de diamètre [10-20[est de 0,02 ± 0,00 et la valeur la plus importante est enregistrée dans la classe de diamètre [90-100[, soit 0,41 ± 0,11 (*cf.* figure A.5).

Globalement, on observe une variabilité importante de l'accroissement diamétrique d'une classe à l'autre ; de même pour l'accroissement en surface terrière chez *P. elata*. Une Analyse de la variance relève une différence très significative entre les accroissements diamétriques moyens obtenus pour chacune des classes de diamètre (ANOVA ; DL = 9 ; F = 52,50 ; p = 0,001), tout comme les accroissements moyens périodiques en surface terrière (ANOVA ; DL = 9 ; F = 1,85 ; p = 0.0001).

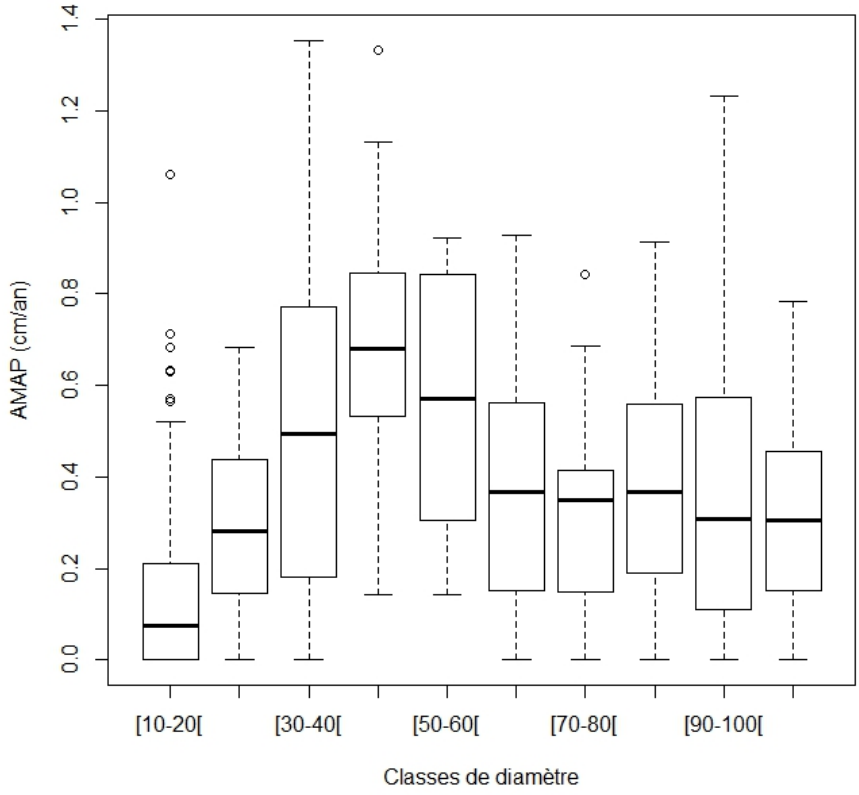


Figure 3.7 – Distribution des accroissements moyens annuels périodiques en diamètre en fonction des classes de diamètre chez *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi (médiane, quartiles inférieur et supérieur, limite supérieure et inférieure).

— **Moyenne générale de l'accroissement diamétrique annualisé chez *P. elata***

Le tableau 3.2 présente la distribution des accroissements diamétriques moyens suivant différents scénarios par classe de diamètre en en forêt aménagée et non-aménagée à Yangambi. En ce qui concerne les blocs d'aménagement (dispositif permanent en layon), un total de 860 individus a été recensé, parmi lesquels 56 jugés aberrants ont été écartés. Les résultats d'accroissements moyens périodiques repris dans le tableau 3.2 concernent donc 804 arbres incluant ceux avec des accroissements nuls ainsi que ceux avec des légers accroissements négatifs. Pour chaque arbre, l'accroissement correspond à la différence entre le diamètre mesuré en septembre 2016 et celui mesuré en février 2018. L'accroissement moyen périodique obtenu au cours de cette période est de 0,24 ± 0,01 cm/an.

Pour ce qui est des dispositifs de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée et non-aménagée, les accroissements obtenus sont calculés sur un pas de temps assez faible (2016-2017) et concernent un total de 173 et 137 arbres du circuit de suivi de dynamique forestière en forêt aménagée et non aménagée respectivement. Malgré cette différence d'effectifs entre les deux types de milieu, la moyenne annuelle de l'accroissement dans ces deux dispositifs est identique : elle vaut 0,44 ± 0,04 cm/an et 0,44 ± 0,06 cm/an respectivement en forêt aménagée et en forêt non aménagée. Pour ce qui est de la distribution de ces accroissements dans les différentes classes de diamètre, aucune différence significative n'a été mise en évidence dans le circuit en forêt non aménagée (ANOVA ; DL = 9 ; F = 2,32 ; p = 0.05). Par contre, dans le circuit en forêt aménagée, on observe une différence significative des accroissements entre les différentes classes de diamètre (ANOVA ; DL = 10 ; F = 9,41 ; p = 0,001).

L'accroissement moyen périodique a aussi été estimé sur un sous-échantillon de 43 arbres, parmi les 804 arbres considérés dans les blocs d'aménagement. Cet effectif est constitué essentiellement d'arbres appartenant à la classe de diamètre [10-20[. Cet accroissement est obtenu sur une période de 8 ans (2012-2018), et vaut 0,19 ± 0,06 cm/an.

Tableau 3.2 – Accroissements diamétriques moyens de *P. elata* (en cm/an ± intervalle de confiance) en fonction des classes de diamètre et des dispositifs.

Classes de diamètre (cm)	**Layon blocs d'aménagement**		**Circuit forêt non-aménagée**		**Circuit blocs d'aménagement**		**Sous-échantillon (2012-2018)**	
	Effectif	AMAP	Effectif	AMAP	Effectif	AMAP	Effectif	AMAP
[10-20[	446	$0{,}13 \pm 0{,}01^{a}$	5	$0{,}30 \pm 0{,}22^{a}$	17	$0{,}07 \pm 0{,}04^{a}$	34	$0{,}11 \pm 0{,}03$
[20-30[	111	$0{,}30 \pm 0{,}03^{b}$	12	$0{,}30 \pm 0,15^{a}$	19	$0{,}33 \pm 0,13^{ac}$	4	$0{,}29 \pm 0{,}17$
[30-40[	44	$0{,}49 \pm 0{,}09^{cd}$	21	$0{,}47 \pm 0{,}10^{a}$	18	$0{,}88 \pm 0,21^{d}$	1	$1{,}04 \pm 0{,}00$
[40-50[	29	$0{,}70 \pm 0{,}10^{e}$	18	$0{,}57 \pm 0{,}15^{a}$	17	$0{,}64 \pm 0{,}13^{bd}$	2	$0{,}81 \pm 0{,}09$
[50-60[	20	$0{,}57 \pm 0{,}11^{de}$	20	$0{,}60 \pm 0{,}18^{a}$	15	$0{,}48 \pm 0{,}13^{bc}$	/	/
[60-70[	28	$0{,}40 \pm 0{,}11^{bd}$	19	$0{,}44 \pm 0{,}10^{a}$	20	$0{,}42 \pm 0{,}10^{bc}$	/	/
[70-80[	31	$0{,}32 \pm 0{,}07^{b}$	20	$0{,}50 \pm 0{,}13^{a}$	9	$0{,}36 \pm 0{,}18^{ab}$	1	$0{,}47 \pm 0{,}00$
[80-90[	24	$0{,}40 \pm 0{,}10^{bd}$	19	$0{,}40 \pm 0{,}08^{a}$	10	$0{,}40 \pm 0{,}17^{ab}$	/	/
[90-100[	35	$0{,}38 \pm 0{,}10^{bc}$	20	$0{,}42 \pm 0{,}10^{a}$	7	$0{,}30 \pm 0{,}18^{ab}$	/	/
≥100	36	$0{,}31 \pm 0{,}07^{b}$	19	$0{,}30 \pm 0{,}07^{a}$	5	$0{,}20 \pm 0{,}18^{ab}$	1	$0{,}30 \pm 0{,}00$
Totaux	**804**	**0,24 ± 0,01**	**173**	**0,44 ± 0,04**	**137**	**0,44 ± 0,06**	**43**	**0,19 ± 0,06**

AMAP est l'accroissement moyen annuel périodique (en cm/an) calculé sur le base des données d'inventaire de septembre 2016 et février 2018. / : pas de valeur ; l'absence de lettres communes indique une différence significative entre catégories de diamètres.

— **Influence de statut social sur l'accroissement diamétrique moyen annuel**

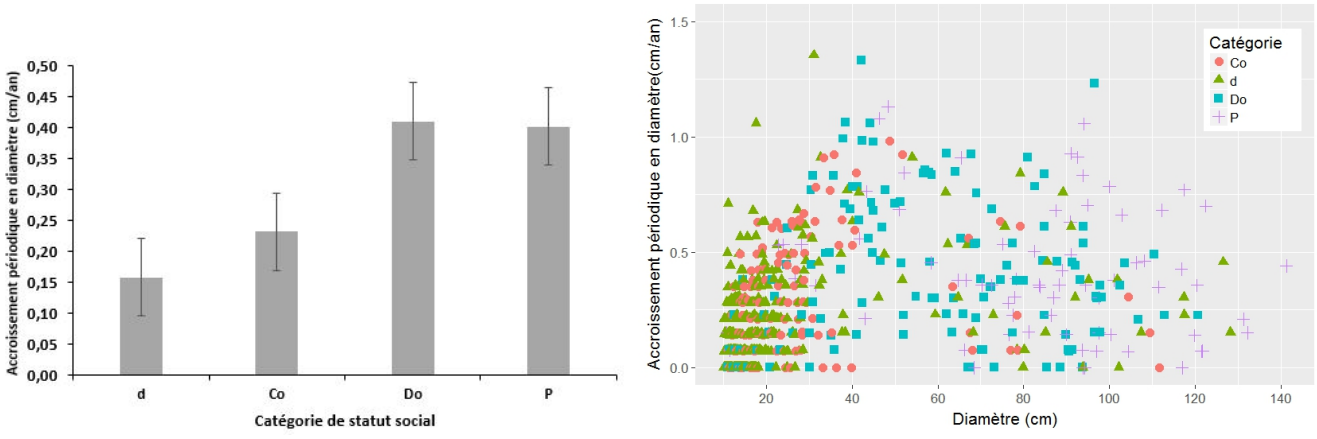
Le tableau 3.3 ci-dessous présente les accroissements moyens annuels périodiques de *P. elata* par catégories de statut social. Globalement, on constate une influence du statut social sur l'accroissement diamétrique. Les résultats de l'analyse de la variance confirment ce constat. Celle-ci montre une différence significative entre les accroissements moyens selon le statut social des arbres (ANOVA ; F = 58,96 ; DL = 3 ; p = 0,001). Les valeurs les plus élevées des accroissements moyens périodiques annuels de *P. elata* dans les blocs d'aménagement au cours des deux années de mesure sont observées au niveau des arbres « Dominants » et « Prédominants ». Cependant, pour ces deux catégories, l'accroissement moyen n'est pas significativement différent (Pr(>F) = 0,001). Les catégories « Dominés » et « Co-dominants » montrent des valeurs moyennes d'accroissements diamétriques les plus faibles, avec une différence non significative entre elles.

Tableau 3.3 – Accroissements diamétriques (en cm/an) de *P. elata* regroupés par statut social.

P. elata	**Dominé**	**Codominant**	**Dominant**	**Prédominant**
Effectif	468	130	134	72
AMAP (cm/an)	0,14 ± 0,02b	0,20 ± 0,02ab	0,41 ± 0,04a	0,40 ± 0,07a

l'absence de lettres communes indique une différence significative des moyennes des accroissements diamétriques entre différentes catégories de statut social

La figure 3.8a illustre une représentation graphique de l'évolution des accroissements moyens annuels périodiques en diamètre par catégorie du statut social chez *P. elata* dans les blocs d'aménagement de Yangambi. La figure 3.8b présente une distribution des individus des différentes catégories du statut social en relation avec les accroissements moyens annuels en diamètre et le diamètre des arbres. La proportion de chaque catégorie du statut social par classes de diamètre est représentée à la figure A.6 (*cf.* annexe 6).



(a) (b)

Figure 3.8 – (a) Distribution des accroissements moyens périodiques (cm/an) pour chaque catégorie du statut social ; (b) distribution des catégories du statut social reliant l'accroisssemnt moyen périodique en diamètre au daimètre des arbres chez *P. elata* à Yangambi. d = Dominé, Co = Codominant, Do = Dominant et P = Prédominant.

3.5.2 Mortalité naturelle annualisée

La distribution du taux annuel de mortalité de *P. elata* dans les blocs d'aménagement est représentée à la figure 3.9. On a comptabilisé un total de 11 tiges mortes, soit un taux global de mortalité annuelle de 0,98 % sur l'ensemble de l'échantillon. Le taux de mortalité le plus élevé est enregistré dans la plus grande classe de diamètre, soit 1,6 %. Il est de 1,4 % et 0,6 % respectivement dans les deux premières classes de diamètre et nul dans le reste des 7 classes de diamètre.

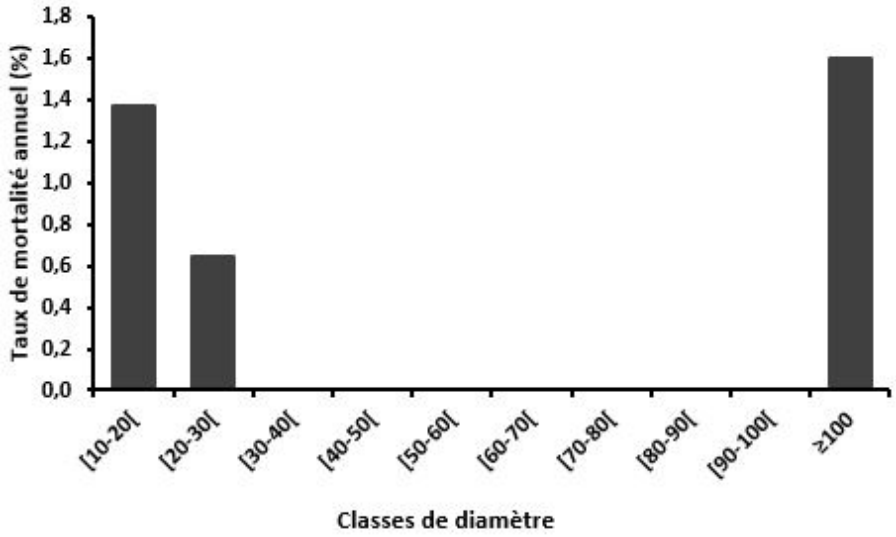


Figure 3.9 – Distribution selon les classes de diamètre du taux (%) de mortalité annualisé de *P .elata* dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement à Yangambi. Ces observations correspondent à la période de septembre 2016 à février 2018.

3.6 Modélisation de la croissance diamétrique de *P. elata*

3.6.1 Modèles indépendants du type de forêt

Nous avons ajusté dans un premier temps trois modèles de croissance à notre jeu de données en excluant l'effet type de forêt. Ces différents modèles ajustés sont exposés dans le tableau 3.4 ci-dessous.

Le modèle ajusté (M1a) de l'accroissement diamétrique potentiel de *P. elata* en l'absence de l'influence du type de forêt est présenté par la figure 3.10 ci-dessous.

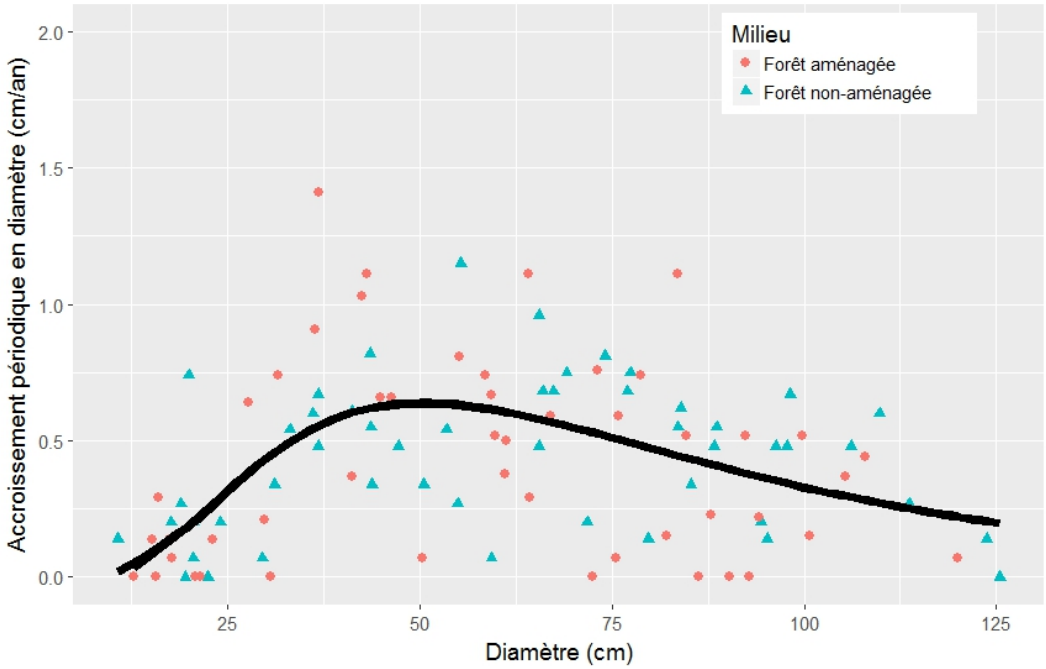


Figure 3.10 – Représentation graphique du modèle de croissance M1a correspondant à l'ensemble du jeu de données (en cm/an, courbe noire) reliant l'accroissement périodique théorique (en cm/an) au diamètre (en cm). Ce jeu de données provient de la combinaison des données des dispositifs en placettes circulaires des circuits de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée (points rouges) et non-aménagée (triangles bleus).

Le tableau 3.4 présente les différents modèles ajustés (M1a, M2a et M3a) au jeu de données, indépendamment du type de forêt. Les modèles M2a et M3a sont ajustés afin d'apprécier l'influence de la compétition du voisinage sur la croissance de *P. elata* dans la région de Yangambi. L'examen des différents critères permettant de juger la performance de ces modèles révèle que les modèles M2a et M3a ne sont pas significativement différents. Le test du rapport de vraisemblance permet de constater que ces deux modèles sont moins performants que le modèles diamétrique M1a, bien que son R^2adj soit plus faible. La distribution des résidus de ces modèles en fonction des valeurs d'accroissements prédites (pour M2a et M3a) et en fonction du diamètre (pour M1a) est présentée dans l'annexe A.9 et A.10.

Tableau 3.4 – Modèles ajustés à l'ensemble du jeu de données des deux circuits de suivi de la dynamique forestière en excluant l'effet type de forêt.

Modèles	Variables	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	ECTr	R^2adj	AIC	*P*
M1a	dbh	0,67***± 0,13	1,18***± 0,23	48,65***± 5,19	/	/	0,49	0,18	48,08	/
M2a	G	0,80* ± 0,46	0,99*** ± 0,19	48,93**± 5,8	6e-3 ± 0,01 (p = 0,41)	/	0,42	0,24	12,68	1
	IC_2	0,36*** ± 0,23	1,17*** ± 0,19	37,75*** ±7,01	-0,34 ± 0,5 (p = 0,18)	/	0,38	0,26	12,28	1
	N_{sup}	0,86 *** ± 0,42	0,81*** ± 0,27	33,50*** ± 20,69	4e-03 ± 5e-03 (p = 0,06)	/	0,49	0,25	8,53	1
M3a	G	0,80** ± 0,47	0,99*** ± 0,20	48,90*** ± 25,69	7e-03 ± 53 (p = 0,12)	-6e-03± 4,69 (p =0,99)	0,43	0,24	14,67	1
	IC_2	0,18 ± 0,28 (p = 0,17)	1,01*** ± 0,21	48,57 ± 77,66 (p = 0,21)	-29,18 ± 315,15 (p = 0,85)	-0,97± 2,65 (p = 0,46)	0,40	0,27	12,60	1
	N_{sup}	0, 94*** ± 0,46	0,97*** ± 0,35	38,13*** ± 16,15	4e-4 ± 2e-3 (p = 0,71)	0,72 ± 1,47 (p = 0,33)	0,49	0,26	10,86	1

Le signe * en haut à droite des valeurs des paramètres k_1, k_2, k_3, k_4 et k_5 représente la *p-valeur* au seuil de significativité de 0,05 % . *** = probabilité hautement significative ($p< 0,001$) ; ** = probabilité très significative ($p< 0,01$), * = probabilité significative ($p< 0,05$) ; *P* représente la *p-valeur* du test du rapport de vraisemblance du modèle restreint (modèle diamétrique M1) contre les modèles complets M2 et M3 (modèle incluant l'intensité de la compétition), ECTr correspond à écart-type résiduel, R^2adj le coefficient de détermination ajusté et AIC le critère d'information d'Akaike.

3.6.2 Modèles dépendants du type de forêt

— Modèles diamétriques M1b et M1c

L'accroissement moyen potentiel du modèle d'étude est présenté par les modèles repris dans le tableau 3.5 ci-dessous. Il s'agit de la croissance potentielle de l'espèce en l'absence de toute compétition. On observe dans le dispositif en placettes circulaires en forêt non-aménagée une croissance potentielle moyenne maximale de l'ordre de 0,60 ± 0,11 cm/an chez des individus de *P. elata* ayant atteint un diamètre moyen de 55,16 ± 9,01 cm. Dans le dispositif similaire en forêt aménagée, l'accroissement potentiel moyen maximal est plus important qu'en forêt non-aménagée et il est atteint un peu plus tôt : 0,78 ± 0,26 cm/ an à 46,16 ± 5,54 cm de diamètre. Dans le dispositif en layon en forêt aménagée (blocs d'aménagement), on a un modèle de croissance plus performant si on s'en tient au R^2adj comparativement aux deux modèles du dispositif en placettes circulaires. On note cependant que ce dernier nous donne un accroissement potentiel moyen maximal plus faible qui est de 0,51 ± 0,04 cm/an pour des individus de 50,00 ± 3,44 cm de diamètre.

Tableau 3.5 – Ajustement des modèles diamétriques de *P. elata* en forêt aménagée, non-aménagée (M1b) et dans le dispositif en layon des blocs d'aménagement (M1c).

Type dispositif	Type de forêt	Effectif	k_1	k_2	k_3	ECTr	R^2adj	AIC
Placette circulaire (M1b)	Forêt aménagée	50	0,78*** ± 0,26	1,40*** ± 0,28	46,16*** ± 5,54	0,65	0,24	34,20
	Forêt non-aménagée	50	0,60*** ± 0,11	1,06*** ± 0,32	55,16*** ± 9,01	0,27	0,24	2,30
Layon (M1c)	Forêt aménagée	804	0,51*** ± 0,04	0,93*** ± 0,07	50,00*** ± 3,44	0,43	0,36	-501,77

Le signe * en haut à droite des paramètres k1, k2 et k3 représente la *p-valeur* au seuil de significativité de 0,05 %. *** = probabilité hautement significative, ECTr = écart-type résiduel, R^2adj = coefficient de détermination ajusté et AIC = critère d'information d'Akaike.

Le tableau 3.6 présente les corrélations entre les différents paramètres des modèles M1b et M1c repris dans le tableau 3.5, en forêt aménagée, en forêt non-aménagée et dans le dispositif en layon des blocs d'aménagement. On observe une forte corrélation entre le paramètre k1 et k2 (un peu plus marquée en forêt aménagée) et une corrélation négative de k3 avec k1 et k2.

Tableau 3.6 – Corrélation entre les différents paramètres des modèles M1b et M1c

	Forêt aménagée			Forêt non-aménagée			Layon FA		
	k1	k2	k3	k1	k2	k3	k1	k2	k3
k1	0	0,69	-0,28	0	0 ,63	-0,25	0	0,63	-0,23
k2		0	-0,17		0	-0,17		0	-0.75
k3			0			0			0

FA = forêt aménagée (blocs d'aménagement)

La figure 3.11 donne une représentation graphique des modèles M1b (*cf.* tableau 3.5 ci-dessus) de l'accroissement potentiel de *P. elata* en fonction du diamètre (en cm) en forêt aménagée et non-aménagée. La représentation graphique de M1c ainsi que les résidus est reprise dans l'annexe A.12 et

les résidus des modèles M1b dans l'annexe A.11.

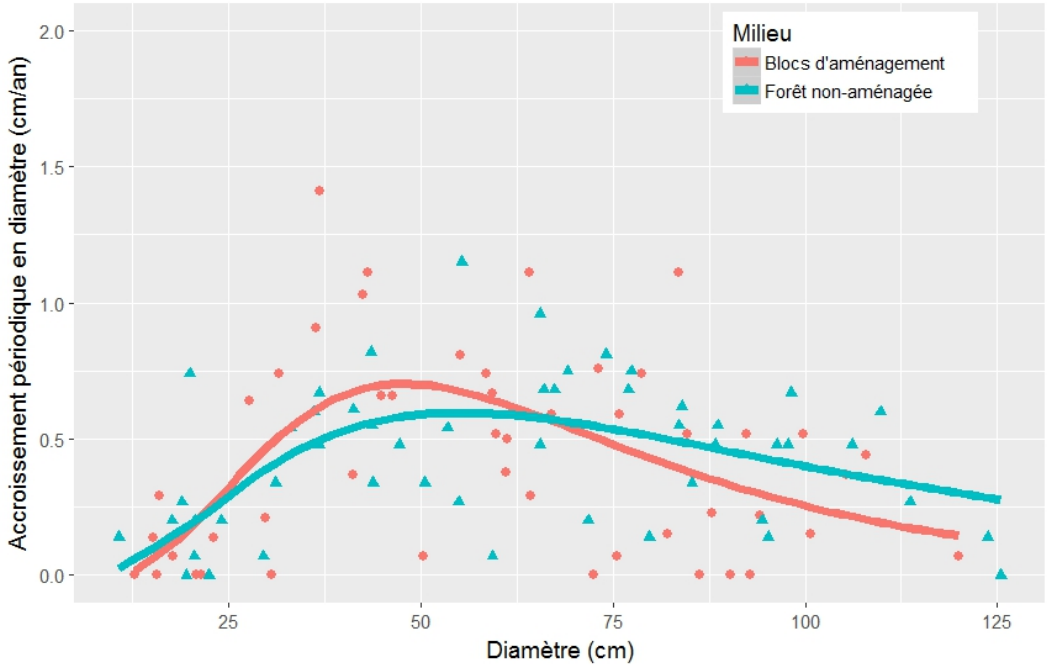


Figure 3.11 – Représentation graphique des modèles diamétriques M1b reliant l'accroissement diamétrique annuel moyen périodique (cm/an) au diamètre (en cm) chez *P. elata* en forêt aménagée et non-aménagée à Yangambi.

— Modèles (M2) à quatre paramètres

Plusieurs modèles ont été ajustés aux données en intégrant aux modèles diamétriques M1b et M1c une variable exprimant l'intensité de la compétition : Modèles M2b et M2c (cas du dispositif en layon). Ces différents modèles à quatre paramètres sont regroupés par types de dispositif dans le tableau 3.7 ci-dessous. On observe globalement que le paramètre k4 n'est pas significatif dans ces modèles au seuil de 0,05% pour ce qui est des modèles M2b ; il l'est en revanche dans le cas des modèles M2c. Par contre, tous les autres paramètres sont significativement différents de 0 ($p < 0{,}05$) à quelques exceptions près. Si on se réfère aux valeurs du R^2adj, on constate que les modèles M2b expliquent le tiers de la variabilité diamétrique chez *P. elata* dans le dispositif en placettes circulaires en forêt aménagée. Le même résultat se dégage pour les modèles ajustés M2c du dispositif en layon des blocs d'aménagement. La variabilité de l'accroissement diamétrique potentiel semble moins s'expliquer par l'intensité de la compétition en forêt non-aménagée. On peut néanmoins remarquer que le R^2adj est resté globalement dans la même fourchette par rapport à ce qu'on a observé avec les modèles M1. Les valeurs d'AIC ont relativement diminué.

Le test du rapport de vraisemblance montre que les modèles M2b n'améliorent pas significativement la variabilité résiduelle observée dans les modèles diamétrique M1b des dispositifs en placettes circulaires en forêt aménagée et non-aménagée. On observe par contre que les modèles M2c du dispositif en layon sont plus performants que le modèle diamétrique M1c compte tenu des *p-valeurs* du test du rapport de vraisemblance qui sont tous inférieures à 0,05 % (*cf.* tableau 3.7 § 3.6.2).

Tableau 3.7 – Modèles de croissance (M2) dépendant de l'intensité de la compétition pour l'ensemble des indices de compétition sélectionnés par types de dispositifs et par types de forêts.

Modèle	**Type dispositif**	**Variable**	**k_1**	**k_2**	**k_3**	**k_4**	**ECTr**	**R^2adj**	**AIC**	**P**
M2b	FNA	G	0,93* ± 0,73	0,87*** ± 0,29	52.43*** ± 10,96	0,01 ± 0,02 (p = 0,19)	0,33	0,23	0,76	0,95
		IC_2	0,30 ± 0,33 (p = 0,07)	1,07*** ± 0,46	37,52*** ± 20,91	-0,36 ± 0,76 (p = 0,33)	0,28	0,22	2,05	0,86
		N_{sup}	0,74 *** ± 0,53	0,67*** ± 0,43	33,47 ± 40,66 (p = 0,10)	4e-3 ± 6e-3 (p = 0,21)	0,35	0,23	0,29	0,95
	FA	G	0,62* ± 0,54	1,17*** ± 0,24	46,97*** ± 6,02	-5e-3 ± 0,02 (p = 0,67)	0,50	0,29	15,56	0,99
		IC_2	0,40* ± 0,40	1,34** ± 0,36	37,51*** ± 12,28	-0,38 ± 0,70 (p = 0,26)	0,45	0,34	14,53	0,99
		N_{sup}	0, 89* ± 0,82	1,04*** ± 0,11	38,93** ± 33,25	3e-3 ± 0,01 (p = 0,58)	0,47	0,32	15,67	0,99
M2c	Layon	Daw	0,63*** ± 0,07	0,80*** ± 0,07	44,06*** ± 4,10	0,12*** ± 0,06	0,44	0,34	-394,51	10e-6
		Van	0,57*** ± 0,07	0,79*** ± 0,07	49,48*** ± 4,54	0,06 ± 0,07 (p = 0,07)	0,48	0,32	-378,08	10e-6

Le signe * en haut à droite des valeurs des paramètres k_1, k_2, k_3, k_4 et k_5 représente la *p-valeur* au seuil de significativité de 0,05 % . *** = probabilité hautement significative ($p< 0,001$) ; ** = probabilité très significative ($p< 0,01$), * = probabilité significative ($p< 0,05$) ; P représente la *p-valeur* du test du rapport de vraisemblance du modèle restreint (modèle diamétrique M1) contre le modèle complet M2 (modèle incluant l'intensité de la compétition), ECTr représente l'écart-type résiduel, R^2adj le coefficient de détermination ajusté et AIC le critère d'information d'Akaike. Daw correspond à l'indice de Dawkins et CF = « crown form » correspond à l'indice de Van Daalen (*cf.*2.4).

— Modèle M3 à cinq paramètres

Les modèles M3b et M3c ajustés en intégrant un cinquième paramètre aux modèles M2b et M2c sont présentés dans le tableau 3.8 ci-dessous. On observe aussi pour ces modèles M3b un effet non significatif du paramètre k4, de même que le nouveau paramètre k5. En se référant aux R^2adj de l'ensemble de ces modèles ajustés (M3b), on constate de manière globale que cet ajustement n'apporte pas d'amélioration par rapport aux modèles M2b. Toujours en terme de R^2adj on observe qu'il n'y a quasiment pas d'amélioration pour ce qui est des modèles M3c du dispositif en layon des blocs d'aménagement ; bien que le test du rapport de vraisemblance notre qu'ils sont plus performants que le modèle M1c.

Les valeurs d'AIC des modèles M3b sont sensiblement plus élevées dans l'ensemble que pour les modèles M1b et M2b du dispositif en placettes circulaires des forêts aménagées et non-aménagées, contrairement à celles des modèles du dispositif en layon des blocs d'aménagement.

Une même lecture que celle précédente peut être faite pour ce qui est du test du rapport de vraisemblance entre ces modèles M3b, M3c et les modèles diamétriques M1b, M1c.

Tableau 3.8 – Modèles de croissance (M3) dépendant de l'intensité de la compétition pour l'ensemble des indices de compétition sélectionnés par types de dispositifs et par types de forêts.

Modèle	Type dispositif	Variable	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	ECTr	R^2adj	AIC	P
M3b	FNA	G	0,94* ± 0,79	0,83* ± 0,62	45,57 ± 66,55 (p = 0,17)	0,07 ± 0,02 (p = 0,88)	-0,39 ± 1,00 (p = 0,82)	0,35	0,23	2,47	0,949
		IC_2	0,16 ± 0,37 (p = 0,37)	0,90* ± 0,67	44,43 ± 13,82 (p = 0,43)	-12,71 ± 185,86 (p = 0,89)	-0,76 ± 3,56 (p = 0,66)	0,30	0,24	3,07	0,927
		N_{sup}	0,86 *** ± 0,42	1,01*** ± 0,63	44,31 ± 0,19 (p = 0,10)	2e-05 ± 2,2e-5 (p = 0,83)	1,56 ± 2,31 (p = 0,75)	0,26	0,30	-0,06	0,988
	FA	G	1,00*** ± 0,21	1,00*** ± 0,32	51*** ± 5,88	-12 ± 53 (p = 0,96)	-9 ± 15,80 (p = 0,26)	0,54	0,27	15,56	0,999
		IC_2	0,24 ± 0,71 (p = 0,49)	1,22*** ± 0,66	41,95 ± 67,69 (p = 0,21)	-10,02 ± 196,43 (p = 0,91)	-0,72 ± 4,67 (p = 0,75)	0,44	0,35	16,29	0,999
		N_{sup}	0, 96* ± 0,89	1,14* ± 0,85	40,95** ± 36,12	3e-5 ± 0,007 (p = 0,92)	0,68 ± 5,17 (p = 0,78)	0,48	0,31	17,67	0,999
M3c	Layon	Daw	0,62*** ± 0,08	0,78*** ± 0,10	43,19*** ± 4,95	0,23 ± 0,53 (p = 0,37)	-0,18 ± 0,68 (p = 0,59)	0,44	0,34	-392,52	10e-06
		CF	0,55*** ± 0,10	0,77*** ± 0,11	48,45*** ± 5,49	0,25 ± 1,33 (p = 0,07)	-0,40 ± 1,75 (p = 0,43)	0,48	0,32	-377,98	10e-06

Le signe * en haut à droite des valeurs des paramètres k_1, k_2, k_3, k_4 et k_5 représente la *p-valeur* au seuil de significativité de 0,05 % . *** = probabilité hautement significative ($p < 0,001$) ; ** = probabilité très significative ($p < 0,01$), * = probabilité significative ($p < 0,05$) ; P représente la *p-valeur* du test du rapport de vraisemblance du modèle restreint (modèle diamétrique M1) contre le modèle complet M3 (modèle incluant l'intensité de la compétition et l'impact de diamètre sur l'intensité de la compétition), ECTr correspond à écart-type résiduel, R^2adj le coefficient de détermination ajusté et AIC le critère d'information d'Akaike. Daw correspond à l'indice de Dawkins et CF = « crown form » correspond à l'indice de Van Daalen (*cf.*2.4).

Chapitre 4

Discussion des résultats

4.1 Éléments de la structure du peuplement de *P. elata* à Yangambi

Le résultat des recherches documentaires sur l'historique des blocs d'aménagement de Yangambi montrent que d'importants travaux sylvicoles y furent initiés. En effet, les interventions sylvicoles peuvent avoir des impacts positifs sur la croissances et le développement des arbres comme l'ont montré Betti *et al.* (2017) au Sud du Cameroun. Ces auteurs rapportent par exemple un accroissement moyen annuel en diamètre de 0,45 cm/an pour un peuplement de *P. elata* qui a fait l'objet d'une intervention sylvicole 6 ans plus tôt ; contre un accroissement de 0,34 cm/an obtenu dans au autre peuplement où aucune intervention n'a été réalisée. L'impact positif des traitement sylvicoles peut aussi se constater par une augmentation considérable de la densité des tiges chez les espèces héliophiles non-pionnières comme *P. elata*. C'est ce qui pourrait expliquer le surnombre de jeunes tiges observé dans les blocs d'aménagement de Yangambi environ 70 ans après les interventions sylvicoles. Vangu-Lutete (1974) rapporte qu'au début des interventions sylvicoles dans les blocs d'aménagement vers la fin de l'année 1949, les tiges de D $\geq$ 10 cm représentaient une densité de 1,2 tiges/ha. Boyemba (2011) a obtenu dans le même dispositif une densité de 6,2 tiges/ha. Nos résultats d'inventaire datant de février 2018 nous ont donné une densité moyenne de 6,4 tiges/ha. On observe donc une évolution assez cohérente de la densité de *P. elata* dans le temps après les interventions sylvicoles. En terme de surface terrière occpée par *P. elata* dans les blocs d'aménagement, nous avons obtenu un total de 0,9 m^2/ha. Ce résultat montre une nette augmentation par rapport à ce qui a été rapporté par Boyemba (2011), soit 0,6 m^2/ha. Cette augmentation peut se justifier par le gain de croissance occasionné par l'ouverture de couvert entre 2009 et 2018.

D'après plusieurs auteurs (Schedl, 1960; Alexandre, 1977; Doucet, 2003; Boyemba, 2011; Menegassi *et al.*, 2011), la structure diamétrique est un indicateur permettant d'apprécier le niveau de régénération d'une essence forestière. La structure diamètrique de notre modèle d'étude obtenue dans les blocs d'aménagement de Yangambi à une forme de « L » caractéristique d'un peuplement avec une bonne régénération naturelle. Cette forme de structure diamétrique est comparable à celle de « J inversé » obtenue par Boyemba (2011) dans le même dispositif. Par contre, il est aujourd'hui admis que *P. elata* souffre d'une carence de régénération naturelle dans l'ensemble de ses aires naturelles de distribution. De ce fait, sa structure diamétrique présente généralement une forme Gaussienne comme l'ont montré Boyemba (2011) dans la forêt de Yoko à Kisangani (RDC), Bourland (2013) et Fayolle *et al.* (2015) dans une forêt de production au Sud-Est du Cameroun et Kouadio *et al.* (2014) à l'Est du Cameroun. La particularité du peuplement de *P. elata* des blocs d'aménagement s'explique donc par cette abondance

des tiges de faible diamètre comme nous avons pu le montrer dans le présent travail à l'échelle de Yangambi (*cf.* figure 3.3 § 3.3.1).

4.2 Accroissement en diamètre et aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale

L'analyse des accroissements diamétriques en fonction des classes de diamètre dans le dispositif en layon des blocs d'aménagement de Yangambi montre une différence très significative entre les différentes classes. Cette observation a aussi été mise en évidence par Boyemba (2011) dans la forêt de Yoko à Kisangani (RDC). Vangu-Lutete (1974) rapporte l'existence chez *P. elata*, d'une plus grande variabilité des accroissements à l'intérieur des classes que entre les classes elles-mêmes dans les forêts de Yangambi. Par contre, Kouadio *et al.* (2014) ont trouvé un résultat un peu similaire à l'Est du Cameroun. Les résultats obtenus par ces auteurs reposent sur un échantillonnage très faible, soit un total de seulement 59 individus. Néanmoins, tout comme nous, Kouadio *et al.* (2014) ont observé la valeur d'accroissement moyen périodique la plus faible dans la plus petite classe de diamètre considérée à savoir : [10-20[. Ce résultat serait lié au tempérament d'espèce héliophile non pionnière reconnu chez *P. elata* (Bourland, 2013; Fayolle *et al.*, 2015). En effet, les aménagements sylvicoles opérés à l'époque dans les blocs d'aménagement visaient à apporter à la régénération naturelle de cette espèce un éclairement suffisant dans le sous-bois. L'ouverture du couvert principal autour des arbres semenciers aurait effectivement entraîné une régénération abondante à certains endroits, mais la refermeture progressive de ce dernier au fil du temps a occasionné un ralentissement de la croissance de la majorité de cette régénération restée dans la strate inférieure de la forêt où elle reçoit désormais peu de lumière. Cette situation pourrait donc expliquer cet accroissement quasi nul observé chez les individus de faible diamètre dans nos résultats. On observe de ce fait que le processus de régénération naturelle et de développement des jeunes individus de *P. elata* impliquent une perturbation assez importante du couvert forestier. Ces individus restés dans la strate inférieure de la forêt seraient donc en attente d'une opportunité de trouée comme un chablis naturel par exemple pour continuer leur croissance de façon normale.

L'accroissement annuel moyen périodique en diamètre de *P. elata* obtenu dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement de Yangambi est assez faible au vu de ce qui est indiqué par différents auteurs. Dans la même région, Vangu-Lutete (1974) et Boyemba (2011) ont obtenu des valeurs d'accroissement de *P. elata* de 0,45 et de 0,42 cm/an respectivement. En effet, cet accroissement de 0,24 ± 0,01 a été obtenu sur un total des 804 individus sur un pas de temps de deux ans ; tandis que les valeurs de 0,45 cm/an (basé sur une période d'observation de 30 ans) (Vangu-Lutete, 1974) et de 0,42 cm/an (basé sur deux années d'observation) (Boyemba, 2011) ont été trouvées sur 11 et 422 arbres respectivement (Betti *et al.*, 2017). Par ailleurs, Bourland *et al.* (2012b) ont obtenu sur 51 arbres au Sud-Est du Cameroun un accroissement de 0,29 ± 0,06 cm/an et 0,31 ± 0,05 cm/an en forêt naturelle exploitée et non-exploitée respectivement. A l'Est du Cameroun, Betti *et al.* (2017) rapportent un accroissement de 0,31 cm/an, très similaire aux résultats de Bourland *et al.* (2012b). Ces résultats ont été obtenus sur une période de deux ans (2007-2009) tout comme les nôtres (2016-2018) ; par ailleurs ces auteurs ont trouvé un résultat similaire sur une période d'observation un peu plus large (2004-2009), soit 0,31 ± 0,05 cm/an. Ce résultat relativement faible que nous avons obtenu pourrait ne pas être statistiquement différent de ceux de Bourland *et al.* (2012b) et de Betti *et al.* (2017). Cependant cette différence serait due au nombre important d'individus pour lesquels on a enregistré des accroissements nuls dans notre échantillon. Notons ici que nous avons observé sur le terrain un

nombre assez important d'individus (tous diamètres confondus) avec une cime complètement envahie par des lianes, cela aurait notablement un impact négatif sur leur croissance et serait aussi un élément explicatif non négligeable de cette valeur d'accroissement observée. Au vu de ce qui précède, on serait tenté de dire que l'écart entre nos résultats et ceux des autres auteurs ne serait pas lié à la taille de l'échantillon considéré pour l'estimation des accroissements ou au pas de temps considéré. Celui-ci serait plutôt dû à une variabilité d'accroissement individuel assez prononcée chez *P. elata* ou encore au fait que les peuplement comparés sont très différents. Selon Betti *et al.* (2017) l'accroissement annuel en diamètre dépendrait de plusieurs facteurs environnementaux incluant le sol, le climat et l'historique de la forêt en termes d'usages antérieurs.

En RDC, comme dans la majorité des pays en Afrique Centrale, le DME et l'accroissement moyen périodique annuel ont souvent été fixés par l'administration forestière Barbara et Kormos (2012). Dans la plupart des cas, ces paramètres ont été fixés de façon empirique, c'est-à-dire en ne prenant pas en compte la structure diamétrique des espèces cibles, ni les paramètres de leurs dynamiques de populations (Boyemba, 2011). Au Cameroun et en République du Congo les administrations forestières respectives ont fixé une valeur standard d'accroissement annuel de 0,40 cm/an pour le calcul du taux de reconstitution de *P. eleta* en forêt de production (Betti *et al.*, 2017). Tandis qu'en RDC, l'administration forestière a retenu une valeur d'accroissement annuel de 0,45 cm/an pour la province de l'Equateur et la province de la Tshopo Betti *et al.* (2017).

Cette manière d'appréhender l'aménagement forestier par ces administrations peut avoir une double conséquence sur les populations de *P. elata*. (i) la première est une surestimation de l'accroissement diamétrique annuel par l'administration ; c'est le cas par exemple à l'Est du Cameroun (*cf.* Bourland (2013)). (ii) La deuxième conséquence est une sous-estimation de l'accroissement diamétrique par l'administration (Boyemba, 2011; Kouadio *et al.*, 2014). Au vu de la variabilité importante des accroissements diamétriques en fonction des classes de diamètre observée dans la région de Yangambi, nous préconisons une adoption par l'administration forestière de la RDC de plusieurs valeurs d'accroissement diamétrique de *P. elata* en fonction des classes de diamètre ; du moins pour les deux premières classes de diamètre en-dessous du DME. Les accroissements de ces deux classes doivent donc être étudiés avec rigueur et vérifier qu'il ne sont pas fonction des régions de provenance.

4.3 Mortalité naturelle chez *P. elata*

Un autre paramètre fondamental pour l'aménagement forestier dans le Bassin du Congo est le taux de mortalité des espèces concernées. Nous avons trouvé un taux de mortalité naturelle annualisé de 0,98 % dans le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement de Yangambi. Cette valeur est assez élevée comparativement à 0,73 % obtenue par Vangu-Lutete (1974) pour des individus de dbh $>$ 12,8 cm de son jeu de données, sur une période de 30 ans dans le même site d'études. Cette différence serait due à la fragilité des jeunes tiges de *P. elata* qui sont plus abondantes dans les blocs d'aménagement. Dans la forêt de Yoko à Kisangani, Boyemba (2011) a trouvé sur une période assez courte un taux de mortalité annualisé de 0,6 %. Outre ces résultats observés en RDC, Bourland *et al.* (2012a) ont enregistré un taux de mortalité annualisé de 1,01 % en forêt de production et une valeur de 0,39 % en forêt naturelle à l'Est du Cameroun. On a observé sur le terrain un nombre considérable (environ 17,5 %) de jeunes tiges de *P. elata* avec un houppier endommagé suite à un chablis dans leur voisinage. Des cas (environ 6,5 %) avec un houppier complètement envahis par des lianes ont aussi été enregistrés. Ces différentes situations présentent des risques de mortalité forts pour ces individus.

4.4 Modélisation de la croissance de *P. elata*

Notre intérêt dans cette partie était notamment de développer des modèles de croissance de *P. elata*, en partant d'un modèle simple avec le diamètre comme seule variable explicative des variations de l'accroissement annuel moyen, vers un modèle plus complexe intégrant divers indices de compétition ; et par la suite, de juger la performance de ces modèles en fonction du type de milieu (forêt aménagée *vs* non-aménagée) et du type de dispositif (dispositif en placettes circulaires autour des arbres focaux des circuits de suivi de la dynamique en forêt aménagée et non-aménagée, dispositif en layon des blocs d'aménagement).

Modèle indépendant du type de forêt

Le premier modèle a été ajusté aux données de l'ensemble des arbres des deux circuits de suivi de la dynamique forestière de la forêt aménagée et non-aménagée, en considérant ainsi que les perturbations du milieu n'avaient pas d'impact sur la croissance de *P. elata*. Cela nous a permis d'obtenir un modèle diamétrique M1a significatif, mais avec un coefficient de détermination ajusté (R^2adj) assez faible de l'ordre de 18 % et un AIC de 48,08. Afin de pouvoir expliquer la part de variabilité résiduelle (*cf.* figure A.8, annexe 7.5) de ce modèle M1a, nous avons retenu trois variables quantitatives décrivant la structure locale du peuplement, G_{ha} IC2 et N_{sup} (*cf.* tableau 2.3) pour exprimer l'intensité de la compétition. Ces variables peuvent considérablement varier selon l'état de maturité de la forêt (Devineau, 1989). Selon Devineau (1989) elles sont fortement influencées par le jeu de la croissance et de la mortalité, qui peut avec le temps se traduire par l'accroissement ou au contraire la stabilité de la surface terrière d'une part et de la densité du peuplement d'autre part. Zuhaidi (2006) considère que dans certains cas, la surface terrière suffit à elle seule à définir l'intensité de compétition subie par les arbres-cibles.

Ce type de variables est fréquemment utilisé dans les modèles de croissance des espèces tropicales d'intérêt. C'est le cas par exemple de la surface terrière utilisée par Obiang *et al.* (2012) dans la modélisation de la croissance de l'Okoumé *(Aucoumea klaineana)* au Gabon ou encore la surface terrière et la densité du peuplement dans le cas de l'Azobé (*Lophira alata*). Les modèles M2a intégrant chacune de ces variables de compétition s'ajustent bien aux données (*cf.* figure A.10, annexe 7.6). Ils expliquent entre 24 et 26 % de la variabilité totale de la croissance annuelle, ce qui améliore nettement le modèle M1a. Ces valeurs de R^2adj plus élevées des modèles M2a sont accompagnées par des valeurs d'AIC plus faibles comprises entre 8,53 et 12,65, témoignant cette amélioration imputable à ces indices de compétition. Un effet similaire de l'influence de paramètres de la structure du peuplement (G_{ha}, N_{sup}) sur la croissance diamétrique a été rapporté par Obiang *et al.* (2013) dans le cas de l'Okoumé au Gabon. Cependant, l'ajustement du modèle M2a aux données avec un paramètre supplémentaire (modèle M3a) n'apporte pas plus de précision sur l'amélioration attendue. Les valeurs d'AIC augmentent légèrement par rapport au modèle M2a et le R^2adj reste en moyenne à 25 % comme précédemment. Si l'on s'en tient aux valeurs de R^2adj et d'AIC du Modèle M2b, on reste en accord avec plusieurs auteurs (Obiang *et al.*, 2012, 2013; Fétéké *et al.*, 2015) qui ont montré que les paramètres de la structure locale du peuplement tels la surface terrière et la densité du peuplement expliquent significativement l'effet de la compétition sur la croissance diamétrique de certaines espèces tropicales d'intérêt. Mais la *p-valeur* du test du rapport de vraisemblance montre que le modèle diamétrique M1a est plus performant que les modèles plus complexes M2a et M3a avec ces variables exprimant l'intensité de la compétition. Rappelons que ces résultats ont été obtenus sur la base d'une hypothèse selon laquelle le type de milieu n'a pas d'impact sur la croissance de l'espèce considérée. Cette hypothèse est infirmée par Fétéké *et al.*

(2015) qui ont obtenu des résultats des modèles d'accroissement en diamètre différents chez plusieurs espèces (notamment *P. elata*) en milieu perturbé par l'exploitation et en milieu non-perturbé. En effet selon plusieurs auteurs (Doucet, 2003; Bourland, 2013; Biwole, 2015; Fayolle *et al.*, 2015) l'ouverture de couvert forestier par le biais de l'exploitation forestière ou par des phénomènes naturels provoque un regain de lumière favorable à la croissance des espèces héliophiles longévives (Bourland *et al.*, 2012b) comme *P. elata*. De ce fait, nous avons élaboré une série de modèles de croissance diamétrique de notre modèle d'étude en considérant l'effet de la perturbation du milieu.

Modèle dépendant du type de Forêt

Les résultats obtenus dans ce cas montrent qu'une part relativement importante des variations de l'accroissement moyen observé en forêt aménagée et non-aménagée est expliquée par le modèle log-normal (M1b) dépendant uniquement du diamètre des arbres (R^2adj = 24 % dans les deux types de forêts, AIC = 34,20 et 2,30 en forêt aménagée et non aménagée respectivement) (*cf.* tableau 3.5, § 3.6.2). Des résultats similaires ont été rapportés par plusieurs auteurs chez différentes espèces d'arbres tropicaux. C'est le cas de Obiang *et al.* (2012) et Biwole (2015) chez l'Azobè au Gabon et au Sud du Cameroun, de Obiang *et al.* (2013) chez l'Okoumé dans plusieurs sites au Gabon. Par ailleurs, on observe que ces modèles de prédiction M1b (R^2adj = 24 %, AIC = 2,30 et 34,20) sont plus performants que le modèle M1a (R^2ddj = 18 % et AIC = 48,08) obtenu en excluant l'effet de la perturbation du milieu sur la croissance. Cependant, si le modèle diamétrique (M1b) s'ajuste bien aux données en forêt aménagée et non-aménagée (*cf.* figures A.11, annexe 7.7) chez *P. elata*, les modèles M2b (à quatre paramètres) et M3b (à cinq paramètres), qui prennent en compte des paramètres de la structure locale du peuplement exprimant l'intensité de la compétition du voisinage, n'améliorent pas significativement la prédiction de l'accroissement diamétrique de notre modèle d'étude. Ces résultats sont différents de ceux obtenus par Fétéké *et al.* (2015), qui ont montré que la compétition traduite par ces variables (en particuliers la surface terrière des arbres de diamètre supérieur au égal à celui de l'arbre-cible) expliquait significativement la variabilité de l'accroissement moyen chez plusieurs espèces d'arbres tropicaux, notamment le moabi (*Baillonella toxisperma*), le sapeli *(Entandrophragma cylindricum*), le tali (*Erythrophleum suaveolens*) et *P. elata*. Les paramètres de la structure locale du peuplement influençant la croissance des arbres en forêt tropicale peut en effet varier fortement d'une forêt à une autre. Selon Devineau (1989) l'âge des peuplements est une cause de variabilité des paramètres de la structure locale du peuplement qui impacte fortement la croissance des arbres en forêt tropicale.

Modèle intégrant des indices qualitatifs pour exprimer l'intensité de la compétition

L'usage des placettes circulaires est la méthode généralement utilisée (Canham *et al.*, 2004; Zuhaidi, 2006; Maleki *et al.*, 2015; Fétéké *et al.*, 2015) pour appréhender l'effet de la compétition du voisinage sur la croissance d'une espèce cible au travers d'un modèle de croissance. Contrairement à cette méthodologie couramment utilisée, nous avons aussi dans ce travail établi des modèles de croissance de *P. elata* sur la base d'un jeu de données issu d'un dispositif permanent en layon dans les blocs d'aménagement de Yangambi. Le peuplement de *P. elata* de ce dispositif a fait l'objet d'interventions sylvicoles visant à « stimuler » la régénération naturelle de cette espèce il y a environ 70 ans. Les indices de compétition utilisés dans ces modèles sont des indices qualitatifs décrivant la forme de la couronne (indice de Van Daalen) et l'accès des arbres à la lumière (indice de Dawkins) (*cf.* tableau 2.4 § 2.9.3 et figure A.2 et A.3, annexes 4.1 et 4.2). Contrairement aux résultats des modèles M2b et

M3b (qui ont montré un effet non significatif de la compétition sur l'accroissement moyen de *P. elata* dans le dispositif en placettes circulaires en forêt aménagée et non-aménagée), les modèles M2c et M3c ajustés aux données de ce dispositif se sont avérés plus performants que le modèle M1c, montrant ainsi qu'une part relativement importante des variations de la croissance observée dans ce dispositif chez *P. elata* est expliquée par l'exposition à la lumière. Cette exposition serait liée aux ouvertures de la canopée occasionnées par les interventions sylvicoles (*cf.* figure A.12, annexe 7.8). Ces résultats corroborent ceux obtenus par Moravie *et al.* (1999). En effet, pour Moravie *et al.* (1999), l'indice de Dawkins s'avère être le meilleur prédicteur de la croissance lorsque le diamètre de l'arbre est connu ; cet indice combine à lui seul des informations sur la position de l'arbre dans la canopée forestière, l'accessibilité aux rayonnements solaires, aussi bien latéralement que verticalement, et les contraintes physiques indirectes liées au voisinage. Cependant, Fétéké *et al.* (2015) ont trouvé que l'indice de Dawkins prédisait moins bien l'accroissement moyen périodique chez *P. elata* par rapport à d'autres indices. Bien qu'étant basée sur un dispositif en placettes circulaires, les modèles de croissance élaborés par Fétéké *et al.* (2015) intégrant l'indice de Dawkins pour exprimer l'intensité de la compétition chez *P. elata* étaient moins performants que les indices intégrant des paramètres de la structure locale du peuplement. La différence entre ces résultats de Fétéké *et al.* (2015) et les nôtres peut se justifier par le fait que : (i) leur modèle de prédiction ne prenait pas en considération l'effet de la perturbation du milieu sur la croissance des espèces considérées (ii) en plus de cela, les perturbations du milieu dans leurs cas étaient non dirigées (liées à l'exploitation forestière) ce qui contraste avec les blocs d'aménagement de Yangambi où les perturbations avaient pour but essentiel de booster la régénération naturelle de *P. elata* et donc de fournir des meilleures conditions d'éclairement. Environ 70 ans après, le résultat des interventions dans les blocs d'aménagement de Yangambi se traduit une structure des populations de *P. elata* qui montre un surnombre de jeunes tiges.

Conséquences des interventions sylvicoles sur la croissance de *P. elata*

Cette troisième catégorie de modèles nous permet finalement de comprendre que les différents résultats obtenus pour les modèles M1b, M2b et M3b dans les deux circuits de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée et non-aménagée sont fortement liés, à la fois au tempérament de l'espèce, et à l'historique de ces peuplements étudiés. En effet, les modèles M1b (*cf.* figure 3.11 § 3.6.2 et la figure A.11, annexe 7.7) montrent que *P. elata* atteint son accroissement moyen potentiel maximal à 55,16 ± 9,01 cm en forêt non-aménagée et à 46,16 ± 5,54 cm en forêt aménagée. On observe que l'accroissement moyen potentiel maximal est plus élevé et obtenu plus tôt en forêt aménagée qu'en forêt non-aménagée. Cette observation est en accord avec le tempérament d'espèce héliophile non-pionnière (Bourland, 2013; Fayolle *et al.*, 2015) de *P. elata*. Selon Pieters (1994) et Boyemba (2011) les plantules de *P. elata* nécessitent une mise en lumière rapide et importante pour poursuivre leur développement.

Les données du dispositif en layon qui ont permis d'ajuster les modèles M1c (*cf.* figures A.12 et A.13, annexe 7.8), M2c et M3c reposent sur un nombre d'individus plus important (804 individus) que ceux du dispositif en placettes circulaires des deux types de forêts (50 individus par type de forêt) et avec une proportion importante de tiges de faibles diamètres. Ces individus jeunes sont le résultat des traitements sylvicoles initiés dans les blocs d'aménagement il y a environ 70 ans. Par contre, tous les arbres du circuit de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée n'auraient pas forcément été ciblés par ces aménagements sylvicoles et par conséquent, l'impact de l'ouverture du couvert sur les arbres du circuit est moins perceptible aujourd'hui sur les gros arbres, contrairement aux petits. On observe effectivement sur la figure 3.4 que les arbres plus gros sont assez distants des poches de régénération

naturelle. Nous pouvons de ce fait imaginer qu'ils n'avaient été ciblés par les interventions sylvicoles ou que les interventions effectuées autour de ces arbres n'ont pas été fructueuses. Les modèles M2c et M3c nous permettent de comprendre que les tiges juvéniles de *P. elata* sont plus sensible à l'ouverture du couvert que les gros. La différence observée entre les courbes de prédiction du Modèle M2b du dispositif en placettes circulaires en forêt aménagée et non-aménagée nous permet de vérifier cela. On constate que les interventions sylvicoles en forêt aménagée ont effectivement eu un effet favorable sur la croissance des juvéniles. La forme de la courbe de croissance (*cf.* 3.11 § 3.6.2) montre une croissance plus importante et plus rapide des jeune tiges en forêt aménagée suite à l'ouverture du couvert. Ces jeunes arbres profitant de cette ouverture atteignent plus vite leur accroissement potentiel maximal (0,78 ± 0,26 cm/an) à environ 46,16 ± 5,54 cm. Cette valeur d'accroissement peut être comparée à 0,46 ± 0,05 cm/an rapportée par Fétéké *et al.* (2015) au Sud du Cameroun en milieu perturbé par l'exploitation forestière 10 ans plutôt. Connaissant l'accroissement moyen annuel maximal et le diamètre moyen correspondant, une petite simulation nous permet de constater que l'âge moyen des jeunes tiges de *P. elata* des blocs d'aménagement est d'environ 70 ans ; ce qui est bien cohérent compte tenu de la période d'initiation des premières interventions sylvicoles dans les blocs d'aménagements de Yangambi. On s'imagine bien qu'après environ 70 ans, le couvert s'est progressivement refermé et les jeunes peuplements retrouvent peu à peu les conditions naturelles avec un accès à la lumière plus faible. D'où cette diminution progressive de la performance comme le montre la courbe de prédiction de la croissance (*cf.* figure 3.11 § 3.6.2). Mais par contre, l'ouverture du couvert serait à moyen terme défavorable au plus gros arbres suite à la prolifération de lianes ligneuses. Des observation de terrain dans les blocs d'aménagements montrent une proportion relativement importante de grosses tiges de *P. elata* avec un houppier enveloppé par des lianes ligneuses. Ce qui pourrait être à l'origine du faible accroissement observé chez les plus gros arbres dans les blocs d'aménagement. La courbe de croissance du modèle M1b en forêt non-aménagée présente par contre une dynamique de croissance plus lente en relation avec le diamètre des arbres et avec le pic de croissance moins marqué qu'en forêt aménagée. Cette forme de courbe de croissance unimodale en fonction du diamètre (Obiang *et al.*, 2013) du modèle M1b obtenue en forêt aménagée est comparable à celles rapportées par Fétéké *et al.* (2015) chez le sapeli et le moabi qui sont des espèces à tempérament héliophile non-pionnière (Doucet, 2003; Fayolle *et al.*, 2015) comme *P. elata* . Obiang *et al.* (2014) ont observé un résultat similaire concernant *L. alata* dans plusieurs peuplements au sein de la concession forestière du Haut Abanga au Gabon.

4.5 Un peuplement de *P. elata* résultat de son passé sylvicole ?

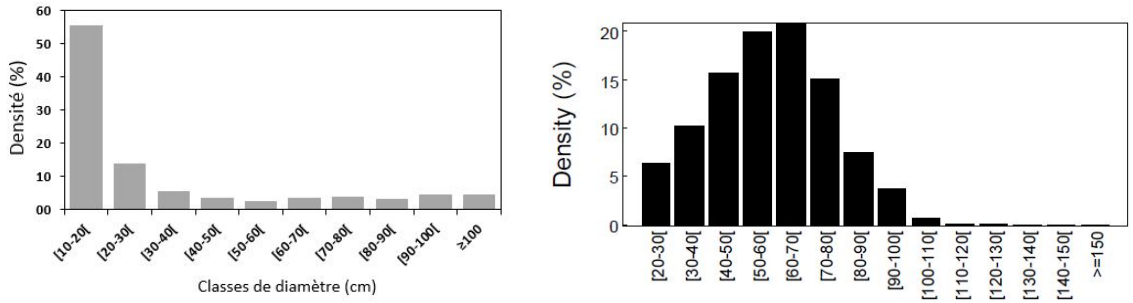
Une des caractéristiques des forêts denses humides d'Afrique Centrale est l'abondance dans la canopée d'arbres héliophiles appartenant à plusieurs espèces (Agyeman *et al.*, 1999; Bourland, 2013; Biwole, 2015) ; la réserve de biosphère de Yangambi n'y fait pas exception. Cette caractéristique serait expliquée par des conditions autrefois favorables pour la régénération naturelle de ces espèces de grands arbres (Hawthorne, 1995). Selon Doucet (2003), une ouverture importante du couvert forestier serait nécessaire pour leur installation. En effet, si on se réfère aux recherches récentes sur les migrations humaines en Afrique Centrale et leur impact probable (Bourland, 2013) sur ces forêts, on s'aperçoit que depuis l'holocène l'homme aurait notablement influencé leur composition (Biwole, 2015).

D'après Bourland (2013), depuis 2.000 ans BP (« Before Present ») les peuples Bantous autochtones des forêts d'Afrique Centrale auraient toujours pratiqué l'agriculture itinérante sur brûlis. Cette pratique traditionnelle aurait (mis à part les évènements climatiques majeurs) significativement ou-

vert la canopée forestière et favorisé l'émergence de ces grands arbres héliophiles, a priori incapables de se régénérer sous le couvert ombragé de ce type d'écosystème. Il est cependant rapporté par Clist (1995) que vers la fin du XIXème siècle, les administrateurs coloniaux européens d'Afrique Centrale avaient pour des raisons multiples, contraint les peuples autochtones installés à l'intérieur des forêts à se regrouper le long des axes de communication. Ce qui aurait entraîné une recolonisation des espaces délaissés par la forêt (Bourland, 2013). Mais depuis lors, l'exploitation forestière aurait contribué à l'écrémage de ces arbres dominant la canopée des forêts d'Afrique Centrale, qui sont pour la grande majorité des essences de haute valeur économique. C'est typiquement le cas de *P. elata*, un des plus importants bois d'oeuvre d'Afrique tropicale.

Au vu de l'importance économique de *P. elata*, de nombreuses recherches furent activement orientées au cours de la moitié du XXème siècle vers le développement de techniques sylvicoles visant à garantir la disponibilité, et à faire face au déficit de régénération naturelle observé chez *P. elata*. La surexploitation et les conditions environnementales locales (micro-climat) et régionales (variations saisonnières) sont le plus souvent évoquées pour expliquer le déclin et ce déficit de régénération naturelle qui s'est accentué au fil du temps chez *P. elata* (Addo-Danso, 2010; Boyemba, 2011). Des essais de plantations avaient été réalisés notamment au Ghana (Taylor, 1960; Addo-Danso, 2010), au Cameroun (Ngueguim *et al.*, 2012; Ouédraogo *et al.*, 2014; Doucet *et al.*, 2016; Betti *et al.*, 2017) et en RDC (Vangu-Lutete, 1974; Yendjogi, 2009; Boyemba, 2011), Mais ces plantations n'auraient pas connu un grand succès et ce pour diverses raisons (Ngueguim *et al.*, 2012).

Cependant, notre intérêt dans ce travail a été particulièrement porté sur le peuplement de *P. elata* des blocs d'aménagement de Yangambi, qui présente une structure de populations exceptionnelle (*cf.* figure 4.1 a). Il est communément rapporté dans la littérature que la structure des populations naturelles de *P. elata* a une forme de courbe de Gauss (*cf.* figure 4.1 b). Cette forme de structure démographique est aussi caractéristique d'autres espèces héliophiles de grande valeur commerciale présentant une carence de régénération naturelle. C'est par exemple le cas chez *Milicia excelca* et *L. alata* (Doucet, 2003; Obiang *et al.*, 2014; Fayolle *et al.*, 2015). La particularité du peuplement de *P. elata* des blocs d'aménagement de Yangambi réside au niveau de cette abondance des jeunes tiges. A notre connaissance, cela n'a pas encore été signalé dans un autre milieu chez cette espèce. Cette abondance de jeunes tiges n'est cependant pas liée à l'ouverture du couvert forestier suite aux perturbations anthropiques (pratiques agricoles traditionnelles) et/ou d'événements climatiques majeurs comme énoncé dans les premières lignes de cette section, mais plutôt le résultats de multiples essais sylvicoles initiés à la fin des années 1940 par les chercheurs de la Division forestière de l'INEAC de Yangambi. Ces essais sylvicoles avaient pour but de provoquer puis stimuler la régénération naturelle de plusieurs essences de bois d'oeuvre et en particulier celle de *P. elata*.



(a) (b)

Figure 4.1 – Représentation graphique de différentes structures des populations de *P. elata* : (a) en forêt aménagée à Yanbambi, (b) d'après Fayolle *et al.* (2015) en forêt naturelle au Sud du Cameroun.

Un des objectifs de ce travail était de décrire ces approches sylvicoles à l'origine de cette abondante régénération naturelle observée dans les blocs d'aménagement de Yangambi, au travers des archives de l'INEAC. Quelles uns de ces essais sylvicoles ont été exposés au chapitre 3. Cependant, au regard de la carte historique (*cf.* figure 3.1) décrivant schématiquement ces essais, on peut avoir le sentiment de n'avoir pas décrit suffisamment ces différentes approches sylvicoles. Plusieurs raisons pourraient expliquer cela :

(i) les sources d'informations sur les activités de l'INEAC étant assez diverses(*cf.* annexe 1), nous serions probablement passés à côté de ces informations malgré nos multiples recherches ;

(ii) la figure 3.1 nous renseigne que les premières interventions sylvicoles dans les blocs d'aménagement auraient commencé en 1947, et se seraient terminées en 1956. Plusieurs chercheurs seraient intervenus dans ces aménagements au cours de cette période, et auraient comme on peut le lire sur cette carte présentée à la figure 3.1 testé des méthodes différentes à chaque fois. On peut penser que nombre de ces chercheurs n'avaient pas eu l'intuition de documenter suffisamment leur travaux, et à plus forte raison si les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants dès les premières années. A ce sujet, la carte nous renseigne que toutes les approches sylvicoles initiées n'ont pas été fructueuses et les observations de terrain nous l'ont confirmé ;

(iii) à la veille de l'indépendance de la RDC en 1960, les installations de l'INEAC auraient été pillées et d'importantes documentations emportées, nul doute que des archives non publiées concernant les blocs d'aménagement auraient pu disparaître à cette occasion ;

(iv) l'examen de la carte à la figure 3.1 montre qu'une part importante d'informations est manquante, et on y observe des traces de brûlures, ces observations amènent à penser qu'elle aurait été en partie consumée par des flammes. Si cela est avéré, on peut imaginer que des informations accompagnant cette carte pourraient avoir été détruites.

Chapitre 5

Conclusion, perspectives et recommandations

5.1 Conclusion

Ce mémoire de fin d'études s'est intéressée en partie à l'historique des essais sylvicoles et à l'estimation de quelques paramètres contrôlant la dynamique de population de *P. elata* dans la région de Yangambi en RDC. Les recherches documentaires ont permis d'en décrire les méthodes sylvicoles testées pour fournir la régénération naturelle, en particulier celle de *P. elata*, dans les blocs d'aménagement de Yangambi. Nous avons en outre identifié quelques facteurs qui pourraient être à l'origine de la carence d'informations concernant l'ensemble de ces méthodes sylvicoles initiées il y a environ 70 ans. Le dispositif permanent en layon des blocs d'aménagement et les dispositifs de suivi de la dynamique forestière installés en forêts aménagée et non-aménagée par l'équipe de recherches du laboratoire de biologie du bois du Musée Royal d'Afrique Centrale nous ont servi de support. Un inventaire systématique par échantillonnage réalisé dans les blocs d'aménagement nous a permis de mesurer quelques paramètres dendrométriques nécessaires au calcul de la densité et de la surface terrière totale occupée par *P. elata* dans les blocs d'aménagement. Une analyse de la structure de population de *P. elata* dans les blocs d'aménagement et en forêt non-aménagé a été réalisée. Sur la base des données d'inventaire collectées dans le cadre de ce mémoire et préexistantes, nous avons pu calculer deux paramètres importants de la dynamique forestière pour notre modèle d'étude, à savoir l'accroissement annuel moyen périodique en diamètre et le taux de mortalité naturelle annualisé. Une variabilité importante des accroissements diamétriques d'un individu à l'autre chez *P. elata* a été mise en évidence. Les inventaires réalisés au sein des placettes circulaires autour d'arbres-cibles appartenant aux circuits de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée et non-aménagée nous ont permis de caractériser le voisinage de *P. elata* en termes d'intensité de la compétition, mais aussi de dominance, d'abondance et de fréquence des espèces accompagnatrices. Trois séries de modèles de croissance de *P. elata* ont été élaborées en fonction du type de forêt et des dispositifs installés dans ces forêts. Des modèles simples faisant intervenir le DBH des arbres comme seule variable expliquant les variations de la croissance, et des modèles intégrant des indices exprimant l'intensité de la compétition ont été testés. L'influence des perturbations du milieu sur la croissance de *P. elata* a été mise en évidence au travers de ces modèles. Dans le cadre d'un plan d'aménagement visant des espèces d'intérêt, la mise en oeuvre de ces modèles est compatible avec des données d'inventaire d'aménagement récoltées au sein de parcelles d'échantillonnage de surface connue (Fétéké *et al.*, 2015). Cependant, la croissance de l'espèce serait influencée par des

facteurs plus complexes que la simple compétition avec les arbres et arbustes de leur voisinage. De ce fait, d'autres modèles plus élaborés intégrant des facteurs édaphiques (par exemple en comparant les performances sur terre ferme *vs.* en milieu marécageux), environnementaux et climatiques sont à envisager afin d'améliorer la prédiction de la croissance de *P. elata*.

L'étude de la dynamique de la croissance d'une espèce comme *P. elata*, nécessite des informations couvrant une période de temps assez large. De même une analyse comparative de cette dynamique de la croissance de l'espèce dans deux milieux différents nécessite des données de même type pour ces deux milieux. Cependant les résultats obtenus dans le présent travail reposent seulement sur une période d'observation de deux ans ; période assez courte pour tirer des conclusions quant à ces résultats. Tout de même, nous ne disposions pas dans tous les cas des données/informations de même type (voire suffisantes) dans ce mémoire en forêt aménagée et non-aménagée, qui nous auraient permis de discuter de manière plus précise les résultats obtenus.

5.2 Perspectives

Ce mémoire de fin d'études a abordé des questions liées à la sylviculture et aux performances de *P. elata* en s'appuyant sur l'analyse d'un peuplement naturel où l'homme est intervenu pour stimuler la régénération naturelle. Quelques paramètres de la dynamique de croissance de cette espèce ont été mis en relation avec la forêt naturelle non perturbée. Cependant, les résultats obtenus dans le présent travail sont à relativiser compte-tenu de la multitude des facteurs impactant la dynamique de croissance d'une telle espèce en milieu forestier.

Au-delà des recherches entreprises jusqu'ici pour l'amélioration des connaissances sur la dynamique de croissance (Tshibangu, 2010; Boyemba, 2011; Bourland, 2013), les approches sylvicoles (Pieters, 1994; Fayolle *et al.*, 2015) et la disponibilité à long-terme d'un stock exploitable (Doucet, 2003) de *P. elata*, l'autoécologie de cette espèce présente encore des zones d'ombre. Par conséquent, un suivi phénologique à long-terme des populations de cette espèce est nécessaire dans l'ensemble de son aire de distribution naturelle. Ainsi, des informations basiques devraient être recensées afin de répondre aux questions fondamentales relatives au mode de pollinisation ; à la fréquence des années de fructification ; à la maturation des fruits et la germination des graines. Les conditions écologiques requises pour le développement des jeunes plantules (notamment l'intensité de lumière nécessaire à la stimulation de la croissance et du développement) et la réduction de la mortalité sont à approfondir.

Lors des travaux de terrain, nous avons observé que *P. elata* fructifie abondamment, mais très peu de gousses arrivent à maturité. Ce phénomène pourrait être lié aux aspects génétiques (Jennings *et al.*, 1999) qui demeurent encore inconnus à ce jour.

Les interventions anthropiques (agriculture itinérante sur brûlis, sylviculture) sur un peuplement naturel induisent des différences importantes par rapport à un peuplement en état naturel. La structure de population des arbres est l'outil le plus souvent utilisé pour appréhender ces différences (Doucet, 2003; Obiang *et al.*, 2013). Dans le présent travail, nous avons mis en évidence une différence entre les peuplements de *P. elata* des blocs d'aménagement et ceux de la forêt non-aménagée de Yangambi au travers de la structure de peuplement. Cependant, une analyse de la distribution spatiale sur la base de données d'inventaire serait une alternative à cette méthode comme l'ont montré Réjou-Méchain *et al.* (2011). Cette méthode alternative pourrait être utilisée pour notre modèle d'étude notamment pour apporter plus de précision par rapport au résultat observé dans le présent travail.

5.3 Recommandations

Bien que le résultat des essais de régénération naturelle de *P. elata* initiés à Yangambi sont appréciables aujourd'hui, cela semble ne pas être une garantie pour la pérennité de l'espèce dans cette région. Les observations de terrain et les résultats obtenus dans le présent travail montrent que les conditions du milieu dans lesquelles ces jeunes individus se trouvent près de 70 ans après les interventions, semblent redevenues similaires aux conditions naturelles. Il semblerait qu'au stade de développement actuel (environ 70 d'âge), *P. elata* soit capable de se mettre dans un état « d'attente ». Dès lors, de grandes ouvertures du couvert accompagnées de coupes sanitaires seraient nécessaires dans les blocs d'aménagement afin de permettre aux jeunes tiges d'avenir de poursuivre leur développement et d'atteindre le stade de semencier.

Pour ce qui est de la régénération naturelle de *P. elata*, Doucet *et al.* (2016); Ouédraogo *et al.* (2014); Fayolle *et al.* (2015) ont montré à l'Est du Cameroun qu'une solution efficiente pouvait consister au regarnissage des trouées d'abattage dans les forêts de production avec des plants issus de pépinière. Bourland (2013) mentionne également des essais de réhabilitation de larges pans de forêt dégradée avec des plants dans ces mêmes forêts (Biwole, 2015). Ces résultats de recherches évoqués sont en relation avec le tempérament de l'espèce, les possibilités de mises en œuvre et les coûts en terme financier, de temps et du personnel Fayolle *et al.* (2015) nécessaires. D'autres travaux sylvicoles devraient privilégier des ouvertures relativement grandes ($\geq$ 50 m de rayon d'après Boyemba (2011)) dans les peuplements à *P. elata* et/ou autour des semenciers comme ce fut le cas dans les blocs d'aménagement de Yangambi.

Ce travail a mis en évidence la complexité que représente l'étude d'une espèce comme *P. elata* en ce qui concerne la prédiction de sa croissance et la régénération naturelle en forêt aménagée et non-aménagée. Comme pour d'autres espèces de grands arbres héliophiles exploitées en Afrique Centrale, assurer une régénération suffisante par plantation devrait davantage permettre de pérenniser ces populations sur le long-terme.

L'administration forestière de la RDC pourrait réviser le DME de *P. elata* qui est de 60 cm actuellement, à 100 cm pour réduire la pression sur les semeciers. Cela permettrait aussi d'assurer une production suffisante de graines pour la régénération par plantation.

Aujourd'hui en Afrique Centrale, le taux de reconstitution représente un paramètre important de l'aménagement forestier durable. Cependant le calcul de ce paramètre prend en compte l'accroissement moyen annuel qui est fixé par les administrations forestières des États membres. Cette valeur unique impose d'utiliser le modèle de croissance simplifié proposé par Durrieu De Madron et Forni (1997). Néanmoins, une connaissance de l'accroissement et de la mortalité par classes de diamètre permettrait d'utiliser le modèle matriciel (*cf.* Picard *et al.* (2008)) et de comprendre l'évolution des populations exploitées au delà d'une seule rotation. Mais, cette valeur fixée ne tient pas compte de la dynamique réelle de croissance des espèces. Dans le cas de *P. elata*, nous avons observé une variation très hautement significative des accroissements moyens annuels périodiques d'une classe de diamètre à une autre. Nous préconisons de ce fait que les administrations forestières des pays d'Afrique Centrale adoptent une valeur d'accroissement moyen annuel pour chaque classe de diamètre chez *P. elata*. Les modèles de croissance élaborés ici sont un outil qui peut leur servir de base pour de futures décisions.

Bibliographie

Addo-Danso, S. D. (2010). Survival and Growth in a Moist-semi Deciduous Forest in Ghana : comparison of monoculture and mixed-species plantations. Thesis, Faculty of Forest and Environmental Science, Albert-Ludwigs University, Freiburg, Germany.

Agyeman, V. K., Swaine, M. D. et Thompson, J. (1999). Responses of tropical forest tree seedlings to irradiance and the derivation of a light response index. *Journal of Ecology*, (87):815–827.

Alexandre, D. Y. (1977). Régénération naturelle d'un arbre caractéristrique de la forêt équatoriale de Côte-d'Ivoire : Turraenthus africana Pellegr. *Ecologia plantarum*, 12(3):241–262.

Ampofo, S. T. et Lawson, G. W. (1972). Growth of Seedlings of Afrormosia elata Harms in Relation to Light Intensity. *The Journal of Applied Ecology*, 9(1):301–306.

Anglaaere, L. C. N. (2008). *Pericopsis elata (Harms) Meeuwen. In :.* Louppe Dominique., Oteng Amoako A. A. & Brink M., eds. Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7(1). Bois d'œuvre 1, Wageningen, The Netherlands : Fondation PROTA, 478-482.

Barbara, L. Z. et Kormos, C. F. (2012). Prospects for Sustainable Logging in Tropical Forests. *BioScience*, 62(5):479–487.

Beaud, M. (2006). *L'art de la thèse : comment préparer et rédiger un mémoire de master, une thèse de doctorat ou tout autre travail universitaire à l'ère du net.* Grands Repères. La Découverte, Paris, Ed. rév., mise à jour et élargie.

Betti, Jean, L., Ngueguim, Romain, J., Kemkeng, F., Ambara, J., Tchatat, M. et Zapfack, L. (2017). Response of Pericopsis elata (Harms) Meeuwen to sylvicultural treatments in some forest plantations of Cameroon. *Agricultural Science Research Journal*, 7(2):71 – 82.

Biwole, A. (2015). *Origine et dynamique des populations d'arbres des forêts denses humides d'Afrique Centrale, le cas de Lophira alata Banks ex Gaertn C.F. (Ochnaceae).* Thèse de doctorat, Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique.

Bonnier, C. (1957). Symbiose Rhizobium-légumineuses en région équatoriale. *Séries Scientifique*, 7.

Bourland, N. (2013). *Dynamique d'une espèce ligneuse héliophile longévive dans un monde changeant : le cas de Pericopsis elata (Harms) Meeuwen (Fabaceae) au sud est du Cameroun.* Thèse de doctorat, Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique.

Bourland, N., Cerisier, F., Daïnou, K., Smith, A., Hubau, W., Beeckman, H., Brostaux, Y., Fayolle, A., Biwolé, A., Fétéké, F., Gillet, J.-F., Morin-Rivat, J., Lejeune, P., Tiba, E., Van Acker, J. et Doucet, J.-L. (2015). How Tightly Linked Are Pericopsis elata (Fabaceae) Patches to Anthropogenic Disturbances in Southeastern Cameroon ? *Forests*, 6(2):293–310.

Bourland, N., Kouadio, Y. L., Colinet, G. et Doucet, J.-L. (2010). Pericopsis elata (Harms) Meeuwen in southeastern Cameroon : ecological and pedological approaches to improve the management of an endangered commercial timber species. *International Forestry Review*, 12(5):111.

Bourland, N., Kouadio, Y. L., Fétéké, F., Lejeune, P. et Doucet, J.-L. (2012a). Ecology and management of Pericopsis elata (Harms) Meeuwen (Fabaceae) populations : a review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 16(4):486–49.

Bourland, N., Lambert, K. Y., Philippe, L., Bonaventure, S., Julien, P., Kasso, D., Fétéké Fousséni et Doucet, J.-L. (2012b). Ecology of Pericopsis elata (Fabaceae), an Endangered Timber Species in Southeastern Cameroon. *Biotropica*, 44(6):840–847.

Boyemba, Faustin, B. (2011). *Écologie de Pericopsis elata (Harms) Van Meeuwen (Fabaceae), arbre de forêt tropicale africaine à répartition agrégée.* Thèse de doctorat, ULB, Bruxelles.

Canham, C. D., LePage, P. T. et Coates, K. D. (2004). A neighborhood analysis of canopy tree competition : effects of shading versus crowding. *Can. J. For. Res.*, 34(4):778–787.

Clist, B. (1995). Gabon : 100 000 ans d'histoire. Centre Culturel Français de Libreville/Ministère de la coopération/Sépra, Libreville.

Demaze, M. T. et Manusset, S. (2009). L'agriculture itinérante sur brûlis en Guyane française : la fin des durabilités écologique et socioculturelle ? *Les Cahiers d'Outre Mer*, n° 241-242:p 31–48.

Devineau, J.-L. (1984). *Structure et dynamique de quelques forets tropophiles de l'ouest africain (cote d'ivoire).* PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

Devineau, J.-L. (1989). Accroissements en surface terrière dans des forêts semi-caducifoliées de Côte d'Ivoire. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série III, Sciences de la vie. *Elsevier*, 309:423–428.

Dickson, B., Mathew, P., Mickleburgh, S., Oldfield, S., Pouakouyou, D., Suter, J. et Suter, D. (2005). An assessment of the conservation status, management and regulation of the trade in Pericopsis elata. *Fauna & Flora International*, Cambridge:UK.

Donis, C. (1956). La forêt dense congolaise et l'état actuel de sa sylviculture. *Bull. Agric. Congo Belg*, 47(2):261–289.

Doucet, J.-L. (2003). *L'alliance délicate de la gestion forestière et de la biodiversité dans les forêts du centre du Gabon.* Thèse de doctorat, Université de Liège - Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux.

Doucet, J.-L., Daïnou, K., Ligot, G., Ouédraogo, D.-Y., Bourland, N., Ward, S. E., Tekam, P., Lagoute, P. et Fayolle, A. (2016). Enrichment of Central African logged forests with high-value tree species : testing a new approach to regenerating degraded forests. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 12(1-2):83–95.

Dupuy, B., Durrieu De Madron, L. et Petrucci, Y. (1998). Sylviculture des peuplements naturels en forêt dense humide africaine. Acquis et recommandations. *Bois et Forêts des Tropiques*, (257):5–22.

Durrieu De Madron, L. (1998). Accroissement et mortalité des arbres en Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des Tropiques*, (258):69–72.

Durrieu De Madron, L. et Forni, E. (1997). Aménagement forestier dans l'Est du Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques*, (254):39–50.

Eckebil, T. P. P., Verheggen, F., Doucet, J.-L., Malaisse, F., Daïnou, K., Omar Cerutti, P. et Vermeulen, C. (2017). Entandrophragma cylindricum (Sprague) Sprague (Meliaceae), une espèce ligneuse concurrentielle en Afrique centrale (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 21(1):80–97.

Essono, D. M., Nwaga, D. et Kono, L. D. (2017). Phénologie fruitière de Pericopsis elata dans la forêt dense humide de Zoulabot et Bidou (Cameroun). *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 3(2):74–88.

Fargeot, C., Forni, E. et Nasi, R. (2004). Reflexions sur l'amenagement des forets de production dans le bassin du Congo. *Bois et Forets des Tropiques*, (281):19–34.

Fayolle, A., Ouédraogo, D.-Y., Ligot, G., Daïnou, K., Bourland, N., Tekam, P. et Doucet, J.-L. (2015). Differential Performance between Two Timber Species in Forest Logging Gaps and in Plantations in Central Africa. *Forests*, 6(2):380–394.

Forni, E. (1997). *Types de forêts dans l'est du Cameroun et étude de la structure diamétrique de quelques essences.* Mémoire DEA, Gembloux, Université des sciences agronomiques de l'état.

Fournier, F. et Sasson, A. (1983). *Écosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique.* Numéro 19 de Recherches sur les ressources naturelles. ORSTOM et UNESCO, Paris, France.

Fétéké, F., Perin, J., Fayolle, A., Daïnou, K., Bourland, N., Lambert Kouadio, Y., Moneye, S. J. J., Bekono, C.-C., Yem, M., Lejeune, P. et Doucet, J.-L. (2015). Modéliser la croissance de quatre essences pour améliorer la gestion forestière au Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques*, 325(3).

Gillet, P., Vermeulen, C., Feintrenie, L., Dessard, H. et Garcia, C. (2016). Quelles sont les causes de la déforestation dans le bassin du Congo ? Synthèse bibliographique et études de cas. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 21(1):80–97.

Gilson, P., Van Wambeke, A. et Gutzwiller, R. (1956). *Notice explicative de la carte des sols et de la vegetation du Congo belge et du Ruanda-Urundi. 6. Yangambi : planchette 2 :Yangambi, A et B.* Bruxelles, ineac édition.

Gourlet-Fleury, S. (1997). Indices de compétition en forêt dense tropicale humide : étude de cas sur le dispositif sylvicole expérimental de Paracou (Guyane française). *Ann. Sci. For*, (55):623–654.

Gourlet-Fleury, S. et Houllier, F. (2000). Modelling diameter increment in a lowland evergreen rain forest in French Guiana. *Forest Ecology and Management*, 131(1):269–289.

Grison, F. (1979). Les plantations d'Assamela (Pericopsis elata) en forêt semi-décidue Camerounaise. Centre de Recherches Forestières. Programme centre et Est. Cameroun. 16 p + Annexe.

Gérard, J., Edi Kouassi, A., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D. et Vernay, M. (1998). *Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains.* CIRAD-Forêt, Série FORAFRI, Doc. 11. Montpellier, France.

Hawthorne, W. D. (1995). Ecological profiles of Ghanaian forest trees. Tropical Forestry Papers 29, Oxford, UK : Oxford Forestry Institute.

Hawthorne, W. D. et Jongkind, C. C. H. (2006). *Woody Plants of Western African Forests. A guide to the forest trees, shrubs and lianes from Senegal to Ghana.* Royal Botanic Gardens, Kew, UK.

Hosonuma, N., Herold, M., de Sy, V., de Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., Angelsen, A. et Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4):12.

Howland, P. (1979). Pericopsis elata (afrormosia). Working paper, Commenwealth Forestry Institute, University of Oxford.

ICRAF (2000). Centre Iinternational pour la Recherche en Agroforesterie : Alternatives to Slash-and-Burn Programme. (http :www.cgiar.org/ICRAF/sys_wide/asb1.htm).

Jennings, S. B., Brown, N. D. et Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and understorey illumination : canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, 72(1):59–74.

Jesel, S. (2005). *Ecologie et dynamique de la régénération de Dicorynia guianensis (Caesalpiniaceae) dans une forêt guyanaise.* Paris, Institut national d'agronomie de Paris Grignon.

Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, E., Montanarella, L., Spaargaren, O., Thiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M., Zougmoré R, Jones, A., Montanarella, L. et Jones, R. (2015). *Atlas des sols d'Afrique.* Union Européenne, Luxembourg.

Karsenty, A., Cerutti, P. O., Doucet, J.-L., Putz, F. E., Romero, C., Bernard, C., Eba'a Atyi, R., Douard, P., Claeys, F., Desbureaux, S., Ezzine De Blas, D., Fayolle, A., Fomété, T., Forni, E., Gond, V., Gourlet-Fleury, S., Kleinschroth, F., Mortier, F., Nasi, R., Nguinguiri, J. C., Vermeulen, C. et De Wasseige, C. (2016). L'aménagement forestier au Congo engendre-t-il plus de déforestation ? *http ://dpfac.cirad.fr/amenagement-et-deforestation.*

Kearsley, E. (2015). *Carbon storage and functional diversity of tropical rainforest in the Congo Basin.* dissertation, Ghent University.

Kouadio, Y. L., Neuba, D. F., Koné, M., Bourland, N. et Doucet, J. (2014). Étude de la croissance diamétrique de quatre essences de bois d'oeuvre exploitées à l'Est du Cameroun. *Journal of Applied Biosciences*, 77(1):6444–6455.

Kyereh, B., Swaine, M. D. et Thompson, J. (1999). Effect of light on the germination of forest trees in Ghana. *Journal of Ecology*, 87(5):772–783.

Laure, N. M. R., William, M. A. et Ndongo, D. (2014). Early growth stages structure and distribution of Pericopsis elata (Harms) van Meeuven in a logging concession of South–East Cameroon. *J. Bio. & Env. Sci.*, 5(3):354–363.

Lebrun, J. et Gilbert, G. (1954). *Une classification écologique des forêts du Congo*. Numéro 63 de Publications de l'INEAC. INEAC, Bruxelles.

Letouzey, R. (1982). *Manuel de botanique forestière. Afrique tropicale. Tome 1*. GERDAT-CTFT, Nogent-sur-Marne, 2. éd édition.

Louis, J. (1943). Contribution a l'étude du genre Afrormosia au Congo belge. *Bulletin du Jardin botanique de l'État*, 17(1):109–116.

Louis, J. et Fouarge, J. (1943). *Essences forestières et bois du Congo. 2 : Afrormosia elata*. Publications de l'INEAC. Hayez, Bruxelles, Belgique.

Madelaine-Antin, C. (2009). *Dynamique des peuplements forestiers tropicaux hétérogènes : variabilité inter et intraspécifique de la croissance des arbres et trajectoires de développement en forêt dense humide sempervirente, dans les Ghâts occidentaux de l'Inde*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.

Maleki, K., Kiviste, A. et Korjus, H. (2015). Analysis of Individual Tree Competition on Diameter Growth of Silver Birch in Estonia. *Forest Systems*, 24(2):023.

Mbala, M. S. (2003). Situation des ressources génétiques forestières de la République démocratique du Congo.Note thématique sur les ressources génétiques forestières. Document de travail FGR/56F. Département des forêts, Division des ressources forestières. FAO, Rome.

Medjibe, V. P., Putz, F. E., Starkey, M. P., Ndouna, A. A. et Memiaghe, H. R. (2011). Impacts of selective logging on above-ground forest biomass in the Monts de Cristal in Gabon. *Forest Ecology and Management*, 9(262):1799–1806.

Menegassi, J. L., da Fonseca, S. F. et Schöngart, J. (2011). Growth and population structure of the tree species Malouetia tamaquarina (Aubl.) (Apocynaceae) in the central Amazonian floodplain forests and their implication for management. *Forest Ecology and Management*, 261(1):62–67.

Moravie, M.-A., Durand, M. et Houllier, F. (1999). Ecological meaning and predictive ability of social status, vigour and competition indices in a tropical rain forest (India). *Forest Ecology and Management*, 117(1):221–240.

Ngongo, M. L., Van Ranst, E., Baert, G., Kasongo, E. L., Verdoodt, A., Mujinya, B. B. et Mukalay, J. M. (2009). *Guide des sols en République Démocratique du Congo, tome I : étude et gestion*. Ecole Technique Salama-Don Bosco, Lubumbashi (RDC).

Ngueguim, J. R., Betti, J. L., Riera, B., Ambara, J., Tchatat, M. et Onana, J. (2012). Growth and productivity of Pericopsis elata (Harms) Meeuwen in some forest plantations of Cameroon. *Forest Science and Technology*, 8(1):1–10.

Nusbaumer, L. P. G. A. (2003). *Structure et composition floristique de la Forêt Classée du Scio (Côte d'Ivoire) : Etude descriptive et comparative*. Thèse de doctorat, University of Geneva, Suisse.

Obiang, E. N., Ngomanda, A., White, L., Jeffery, K., Chézeaux, et Picard, N. (2013). Disentangling the effect of size and competition : a growth model for Aucoumea klaineana. *Annals of Forest Science*, 70(3):241–249.

Obiang, E. N. L., Ngomanda, A., Hymas, O., Chézeauxl, et Picard, N. (2014). Diagnosing the demographic balance of two light-demanding tree species populations in central Africa from their diameter distribution. *Forest Ecology and Management*, 313:55–62.

Obiang, E. N. L., Ngomanda, A., White, L., Jeffery, K. J., Chézeaux, E. et Picard, N. (2012). A growth model for azobé, Lophira alata, in Gabon. *Bois et Forêts des Tropiques*, pages 65–72.

Ouédraogo, D.-Y., Fayolle, A., Daïnou, K., Demaret, C., Bourland, N., Lagoute, P. et Doucet, J.-L. (2014). Enrichment of Logging Gaps with a High Conservation Value Species (*Pericopsis elata*) in a Central African Moist Forest. *Forests*, 5(12):3031–3047.

Picard, N. et Gourlet-Fleury, S. (2008). *Manuel de référence pour l'installation de dispositifs permanents en forêt de production dans le Bassin du Congo*. COMIFAC.

Picard, N., Mortier, F. et Chagneau, P. (2008). Influence of estimators of the vital rates in the stock recovery rate when using matrix models for tropical rainforests. *Ecological Modelling*, 214(2-4):349–360.

Pieters, A. (1994). *Natural regeneration in the equatorial forest of the Yangambi region, applied to Afrormosia elata Harms*. Thèse de doctorat, Université de Gent, Belgium. 213.

Réjou-Méchain, M., Fayolle, A., Nasi, R., Gourlet-Fleury, S., Doucet, J.-L., Gally, M., Hubert, D., Pasquier, A. et Billand, A. (2011). Detecting large-scale diversity patterns in tropical trees : Can we trust commercial forest inventories ? *Forest Ecology and Management*, 261(2): 187–194.

Schedl, K. E. (1960). *Insectes nuisibles aux fruits et aux graines*. Numéro 82 de Publications de l'INEAC. INEAC, Bruxelles.

Schmitz, A. (1962). Établissement d'une courbe de répartition par âge d'une essence caducifoliée (Application à l'Afrormosia elata Harms). *Bull. Soc. R. For. Belg*, 69(12):517–550.

Schupp, E. W. (1992). The Janzen-Connell Model for Tropical Tree Diversity : Population Implications and the Importance of Spatial Scale. *The American Naturalist*, 140(3):526–530.

Stassart, D. (2012). Diagnostic territorial de la zone de Yangambi, une histoire au service de l'avenir ? Mémoire de fin d'étude, Faculté des bioingénieurs, Université Catholique de Louvain, Belgique.

Taylor, C. J. (1960). Synecology and silviculture in Ghana. *Thomas nelson and Sons Ltd, London, UK*.

Tchatchou, B., Sonwa, D. J., Ifo, S. et Tiani, A. M. (2015). *Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo : État des lieux, causes actuelles et perspectives*. CIFOR,Papier occasionnel 120. Bogor, Indonesie.

Toussaint, L., Wilczek, R., Gillett, J. B. et Boutique, R. (1953). *1953. Flore du Congo Belge et du Ruanda-Urundi : Papilionaceae (Sophoreae, Genisteae, Trifolieae et Loteae)*. Vol. IV. Bruxelles : INEAC.

Tshibangu, K. w. T. (2010). Etude corrélative entre la phénologie du Pericopsis elata HARMS et les paramètres écoclimatiques dans la région de Yangambi en République Démocratique du Congo. *Geo-Eco-Trop*, 34:127–138.

UNEP-WCMC (2018). Report on species/country combinations selected for review by the Plants Committee following CoP17. UNEP-WCMC, Cambridge.

Van Daalen, J. (1993). The Value of Crown Position and Form as Growth Indicators in Mixed Evergreen Forest. *South African Forestry Journal*, 165(1):29–35.

Vangu-Lutete, C. (1974). *Accroissement en circonférence de l'Afrormosia elata Harms (Syn. Pericopsis elata Harms) Dans une forêt naturelle de Yangambi.* Thèse de doctorat, Université National du Zaïre, Yangambi-RDC.

Veenendaal, E. M., Swaine, M. D., Lecha, R. T., Walsh, M. F., Abebrese, I. K. et Owusu-Afriyie, K. (1996). Responses of West African Forest Tree Seedlings to Irradiance and Soil Fertility. *Functional Ecology*, 10(4):501–511.

Vivien, J. et Faure, J.-J. (2011). *Arbres des forêts denses d'Afrique centrale.* Nguila Kerou. Clohars-Carnoët.

Yendjogi, Sammuel, B. (2009). *Analyse des conditions de régénération de Pericopsis elata (Harms) Van Meeuwen dans la forêt naturelle aménagée de Yangambi (RDC).* Mémoire d'Etudes Approfondies (D.E.A) en Gestion de la Biodiversité et Aménagement Forestier Durable, Université de Kinshasa. 130.

Zapfack, L. (2005). *Impact de l'agriculuture itinérante sur brûlis sur la biodiversité végétale et la séquestration du carbone.* Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I, Yaoundé.

Zuhaidi, Y. A. (2006). Modelling tree diameter growth of plantation grown Dryobalanops sumatrensis. *Journal of Tropical Forest Science*, 18(4):203–211.

Annexe A

Annexes

A.1 Choix des bibliothèques et centres de documentation

— Bibliothèque des Sciences et Technologies de l'UCL

Il nous a semblé évident de commencer nos recherches dans un lieu qui nous est le plus facilement accessible. Nous avons jugé nécessaire de ne pas négliger les ressources documentaire de la BST. Pour ce faire, nous avons consulté le catalogue en ligne en nous servant des mots-clès, des dates et noms d'auteurs qui nous a permis de dresser notre fichier de référence. Notons qu'à la BST, il y a une bibliothécaire qui s'occupe essentiellement des collections relatives à la RDC, et avec qui nous avons collaboré. Étant donné que les collections de l'INEAC constituent des documents historiques très peu consultés, elles sont en majorité très peu accessibles en ligne. Raison pour laquelle nous avons transmis les mots-clés et quelques informations supplémentaires à la bibliothécaire qui s'est chargée de rechercher par un moyen plus restreint certains de ces documents pour nous. Cette documentation était pour l'essentiel à consulter sur place. Pour être plus efficient dans notre recherche, nous procédions par l'examen des tables de matières pour repérer des articles et rubriques d'ouvrages utiles pour nous. Vu le peu de temps dont nous disposions pour passer en revue ces documents, nous avons le plus souvent fait des scans ou des photocopies pour exploiter plus posément plus tard.

— Bibliothèque des sciences agronomiques de Gembloux Agro-Bio Tech

Le choix de Gembloux pour notre recherche a été motivé par le fait que la Faculté d'agronomie de Gembloux existait déjà à l'époque de l'INEAC et nombre de chercheurs de l'INEAC notamment de la Division forestière y étaient formés et/ou y enseignaient. Une autre raison est que l'impression des publications de l'INEAC avait éé délocalisée de Léopoldville (Kisangani) à Gembloux en 1947. Pour ces raisons, nous avons pensé qu'une part importante des archives et publications de l'INEAC pourrait être disponible à la bibliothèque des sciences agronomiques de Gembloux Agro-Bio Tech. Le caractère historique de ces documents imposait tout comme à la BST une consultation sur place, mais ceux pouvant être empruntés l'on été sans difficulté, étant donné que les étudiants de l'UCL se voient appliquer les mêmes règles que ceux de Gembloux en matière d'accès à la documentation de la bibliothèque. La même stratégie que celle utilisée à la BST de l'UCL a été adoptée ici pour la consultation des documents mis à notre disposition.

— Musée Royal de l'Afrique Centrale (MARC)

Le MRAC a en son sein un centre de recherche qui opère depuis plusieurs décennies en RDC, notamment dans la région de Yangambi. Ce centre est très actif dans les domaines de la biologie du bois, la systématique, l'écologie et la sylviculture des essences forestières tropicales. Dans le cadre de ses

recherches, le MRAC se serait procuré une importante documentation, notamment des publications de l'INEAC. C'est ce qui nous a motivé à nous référer au MRAC pour notre recherche documentaire. La méthode de « la remontée des filières bibliographiques » nous a permis de dresser une liste de références, que nous avons transmise à la bibliothécaire pour qu'elle puisse regrouper ces documents pour nous, du moins ceux qui étaient disponibles là-bas. Notons que le Musée n'a pas de catalogue consultable en ligne. Une fois ces documents regroupés, nous nous sommes rendu sur place pour les passer en revue.

— Archives nationales (Bruxelles)

Les archives nationales étant un lieu par excellence où on peut retrouver les archives de diverses institutions étatiques de l'époque comme l'INEAC, il nous a semblé nécessaire de nous y rendre. Les archives nationales disposent d'un inventaire (en Néerlandais) bien structurés de l'ensemble des archives qui y sont disponibles. Pour accéder à ces archives, il faut se rendre sur place à Bruxelles et se faire établir préalablement une carte de lecteur. Des postes sont disponibles dans la salle de lecture à partir desquels le lecteur commande des archives. Pour ce faire on se sert de son mon de lecteur, du numéro de sa carte de lecteur, du numéro de l'inventaire concerné par sa recherche et d'un numéro contenu dans l'inventaire et correspondant aux archives qu'on souhaite consulter. L'inventaire étant rédigé en Néerlandais, nous nous sommes servi d'un dictionnaire Néerlandais-Français et Français-Néerlandais, disponible dans la salle de lecture, pour traduire nos mots-clés afin d'effectuer la recherche. Les numéros commandés sont disponibles trente minutes après la commande. Pour des raisons d'efficience dans la recherche, nous avons pris des photographies des archives qui nous paraissaient intéressantes pour notre sujet, vu que la consultation de ces archives se fait exclusivement sur place et dans la salle de lecture.

— Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer

L'Académie Royale des Sciences d'outre-Mer est une institution qui a pour principale vocation, la promotion de la recherche et la diffusion des connaissances concernant les pays d'Outre-mer. Elle fut fondée en 1929 [1], et aurait depuis quelques décennies bénéficié du patrimoine d'un magasin qui commercialisait les publications de l'INEAC. C'est au cours d'une discussion qu'à eu le Dr. Nils Bourland avec un de ses collègues que l'idée est venue de se pencher aussi vers cette institution pour notre recherche documentaire sur les blocs d'aménagement de Yangambi. Tout comme ailleurs, le caractère historique de la documentation disponible ici imposait une consultation sur place.

— Bibliothèque centrale de l'INERA (Yangambi)

Pour clôturer notre série de recherche documentaire sur les blocs d'aménagement de Yangambi, nous sommes allez à la bibliothèque centrale et à la division forestière de l'INERA de Yangambi. En effet, la bibliothèque centrale de Yangambi était le principal centre de concentration des publications scientifiques et techniques de l'INEAC. Nous avons donc pensé que Bibliothèque centrale de l'INERA de Yangambi était l'endroit par excellence pour effectuer la recherche sur l'historique des activités sylvicoles dans les blocs d'aménagement.

A.2 Ouverture des layons et inventaire des tiges de *P. elata*

La collecte de données nécessitait de parcourir le dispositif en layon existant. Pour cela, l'équipe de travail était constituée de quatre techniciens, dont un nettoyeur chargé du dégagement des layons sur 1,5 mètre de large, afin de faciliter les déplacements le long de ces derniers ; un jalonneur chargé de

1. http://www.kaowarsom.be/fr/index

préparer et de codifier les jalons sur le bout supérieur blanchi à partir du point de départ ; et enfin, au bout de la chaîne, deux chaîneurs qui s'activaient à planter des jalons tous les 25 m à partir du point zéro et au fur et à mesure qu'on avançait dans le layon. Pour ce faire, la première personne tient une extrémité du penta-décamètre au point de départ du layon (point zéro), et la deuxième personne le déroule jusqu'à 25 m où il fixe le deuxième jalon sur lequel est inscrit au marqueur à encre indélébile le chaînage cumulatif et le numéro du layon. L'opération est recommencée en se référant cette fois au deuxième jalon comme point de départ et en implantant le troisième jalon 25 mètres plus loin et ainsi de suite. En procédant de la sorte, on chaînait automatiquement tous les 25 mètres. Mais pour des inventaires forestiers classiques, la distance unitaire généralement admise est de 50 mètres. Ceci étant, afin de pouvoir facilement contourner certains obstacles rencontrés sur notre chemin, et de garantir une meilleure précision de notre chaînage, nous avons préconisé d'implanter nos jalons à tous les 25 mètres. Au fur à mesure que nous avancions dans le layon, toute l'équipe et surtout la personne en tête, était chargée de repérer les pieds de *P. elata* situés dans les 30 m de part et d'autre du layon. Une fois qu'un pied de *P. elata* était repéré, le nettoyeur était chargé de dégager le chemin d'accès à ce dernier. Le deuxième chaîneur visait à l'aide d'une boussole la tige repérée pour s'assurer de l'alignement horizontal de ce dernier par rapport au layon, et par la suite il communiquait les coordonnées cartésiennes à partir du layon. La coordonnée en x était lue directement sur le penta-décamètre tendu le long du layon, et la coordonnée en y prise le cas échéant à l'aide d'un *Forestry Pro* ; à défaut un penta- décamètre était tendu jusqu'au pied de l'arbre. Par la suite, le diamètre de l'arbre repéré était mesuré à l'aide d'un ruban diamétrique par le second chaîneur. Les coordonnées géographiques étaient également prises à l'aide d'un GPS (Garmin GPSMAP 62stc). Les mêmes actions étaient répétées jusqu'au point d'arrivée à l'autre bout du layon.

A.3 Marquage des arbres dans le dispositif en layon

Dans le dispositif en layon installé dans les blocs d'aménagement, un identifiant (numéro) avait été attribué à chaque individu de *P. elata* en 2016. Ces numéros avaient été marqués à la peinture sur chaque arbre de D≥10 cm. Après deux ans, ces identifiants étaient à peine lisibles pour certains arbres et surtout les plus gros à cause de la desquamation fréquente de l'écorce de *P. elata*. Néanmoins le déchiffrage a été facilité par l'équipe de travail, puisque c'est la même qui avait marqué ces arbres en 2016. Nous avons donc au cours de cet inventaire procédé au re-marquage de toutes les tiges de *P. elata* du dispositif et ceci dans le but de faciliter le repérage de ces tiges lors d'une prochaine campagne de mesures. Il est à noter que lors de notre passage, les individus ayant atteint le seuil d'inventaire ou les oubliés de l'inventaire de 2016 ont été marqués et rajoutés à la base de données, mais cela n'était qu'occasionnel.



(a) (b)

Figure A.1 – Marquage des arbres suivis dans les blocs d'aménagement de Yangambi : (a) Arbre avec identifiant datant de 2016 (b) même arbre avec l'identifiant renouvelé en 2018 (Blocs d'aménagement de Yangambi, 08 mars 2018)

A.4 Indices de compétition

Les facteurs influençant la croissance des arbres en forêt ont fait l'objet de nombreuses études (Madelaine-Antin, 2009). Ces facteurs peuvent être vus à différentes échelles. Il peut s'agir des facteurs liés à l'arbre, des interactions de compétition entre arbres, des facteurs édaphiques, des facteurs liés aux variations climatiques où encore ceux liés à la morphologie de l'arbre focal (Madelaine-Antin, 2009) . Pour ce qui est de la compétition entre arbres, c'est essentiellement elle qui régule l'accès d'un individu aux ressources (lumière, eau ou nutriments) qui lui sont nécessaires (Gourlet-Fleury, 1997), d'où l'intérêt d'essayer dans ce travail de quantifier au mieux ce phénomène en s'appuyant sur les indices développés dans les peuplements forestiers tempérés. Notons que dans la plupart des cas, les compétiteurs, c'est-à-dire les voisins intervenant dans le calcul de ces indices, sont situés à l'intérieur d'une placette circulaire de rayon arbitrairement fixé, centrée sur l'arbre-cible. Plusieurs indices de compétition ont été utilisés pour mettre en évidence la compétition entre arbres dans le peuplement de *P. elata* des blocs d'aménagement de Yangambi (*cf.* tableaux 2.3 et 2.4). Dans cette annexe, nous décrivons plus en détails le code de Dawkins et l'indice de Van Daalen.

A.4.1 Code de Dawkins

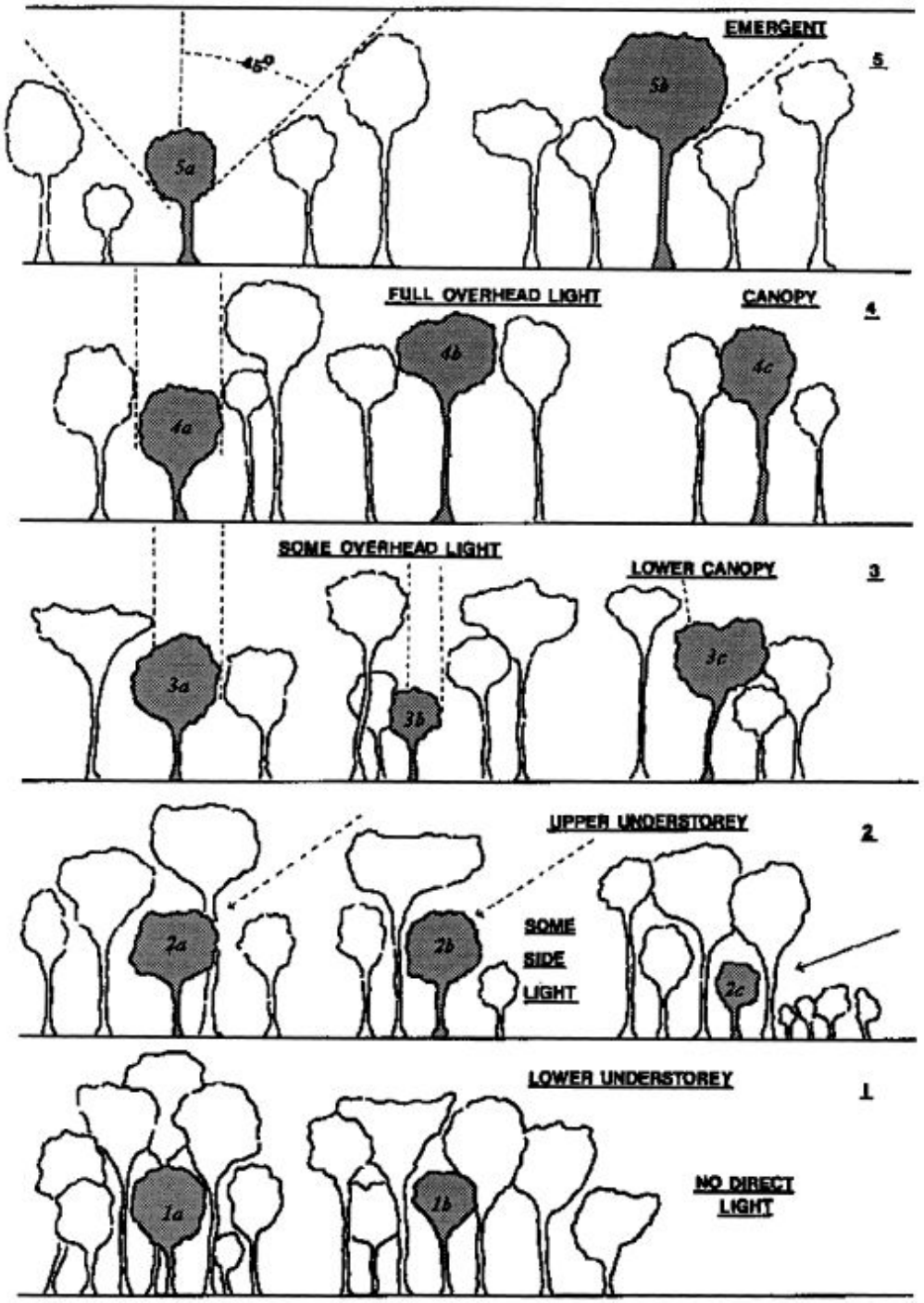


Figure A.2 – Schéma descriptif de l'indice de Dawkins d'après Jennings *et al.* (1999)

A.4.2 Indice de forme de la couronne (indice de Van Daalen)

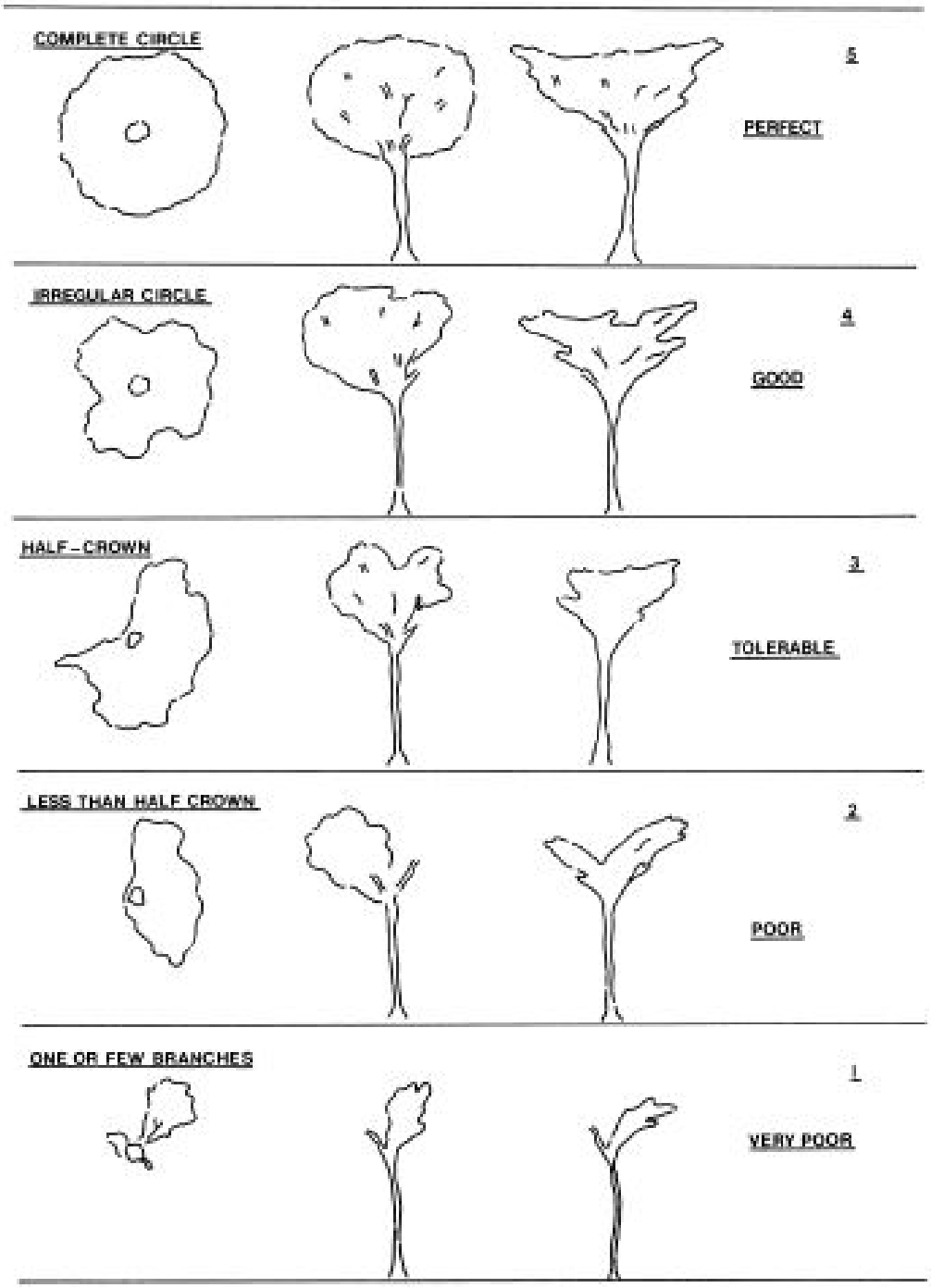


Figure A.3 – Schéma descriptif des différentes forme de couronne des arbres (Van Daalen, 1993)

A.5 Accroissement moyen annuel périodique en surface terrière chez *P. elata*

— Relation entre l'accroissement moyen annuel périodique en G et G initiale chez *P. elata*

La figure A.4 ci-dessous présente une distribution des accroissements annuels moyens en surface terrière (en m^2/an) obtenus au cours de la période de septembre 2016 à février 2018 en fonction de la surface terrière initiale (septembre 2016) chez *P. elata*. Au vu de cette distribution, on constate que l'accroissement en G augmente fortement en fonction de l'importance de G initiale. Cette distribution semble très peu uniforme, avec une allure générale en forme d'entonnoir. Tout comme les accroissements moyens annuels en diamètre, on constate qu'il y a une assez grande variabilité des accroissement annuels moyens en surface terrière au sien des individus de même diamètre chez cette espèce.

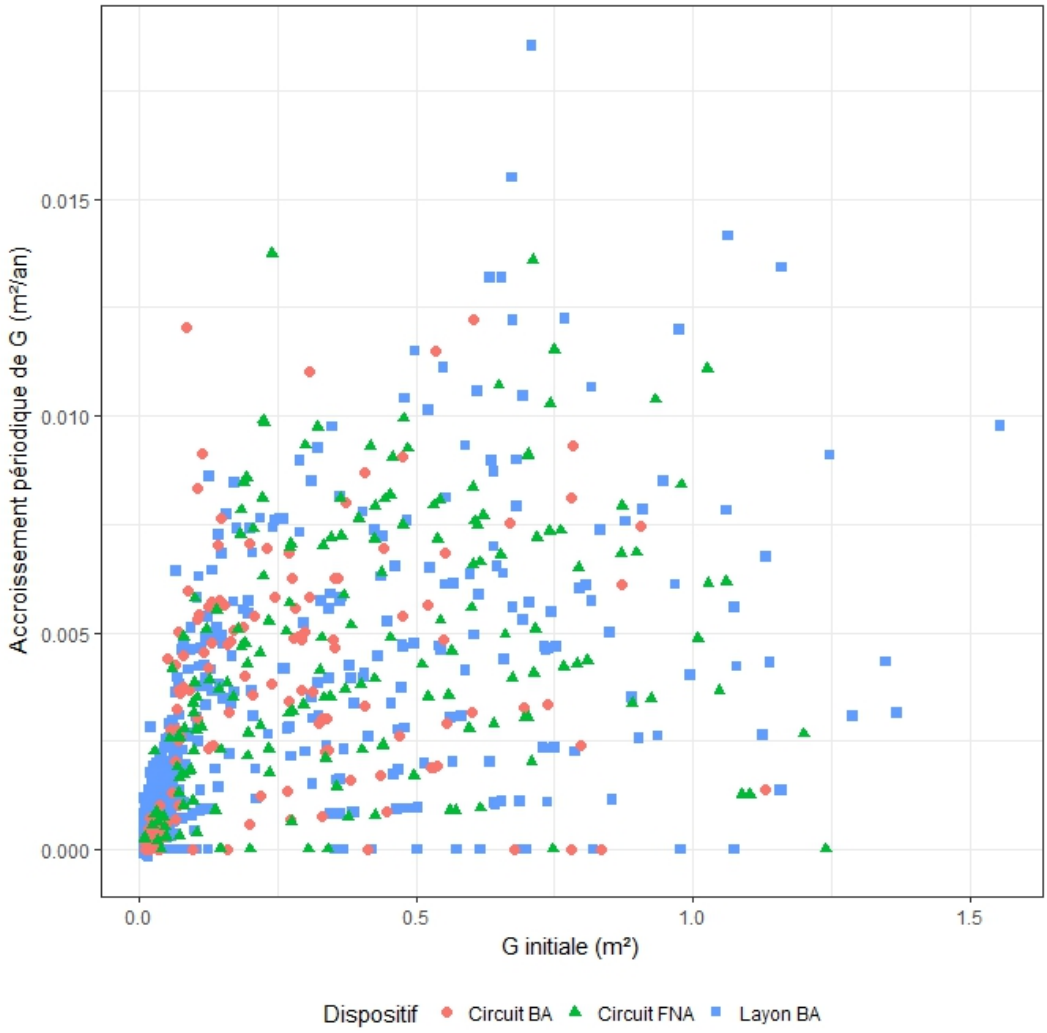


Figure A.4 – Distribution des accroissements annuels moyens périodiques en G (en m^2/an) en fonction du G initial (m^2) chez *P. elata* dans les blocs d'aménagement (Layon BA), dans le circuit de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée (Circuit BA) et non-aménagée (Circuit FNA) de Yangambi.

— Distribution des accroissements moyens annuels en G en fonction des classes de diamètre

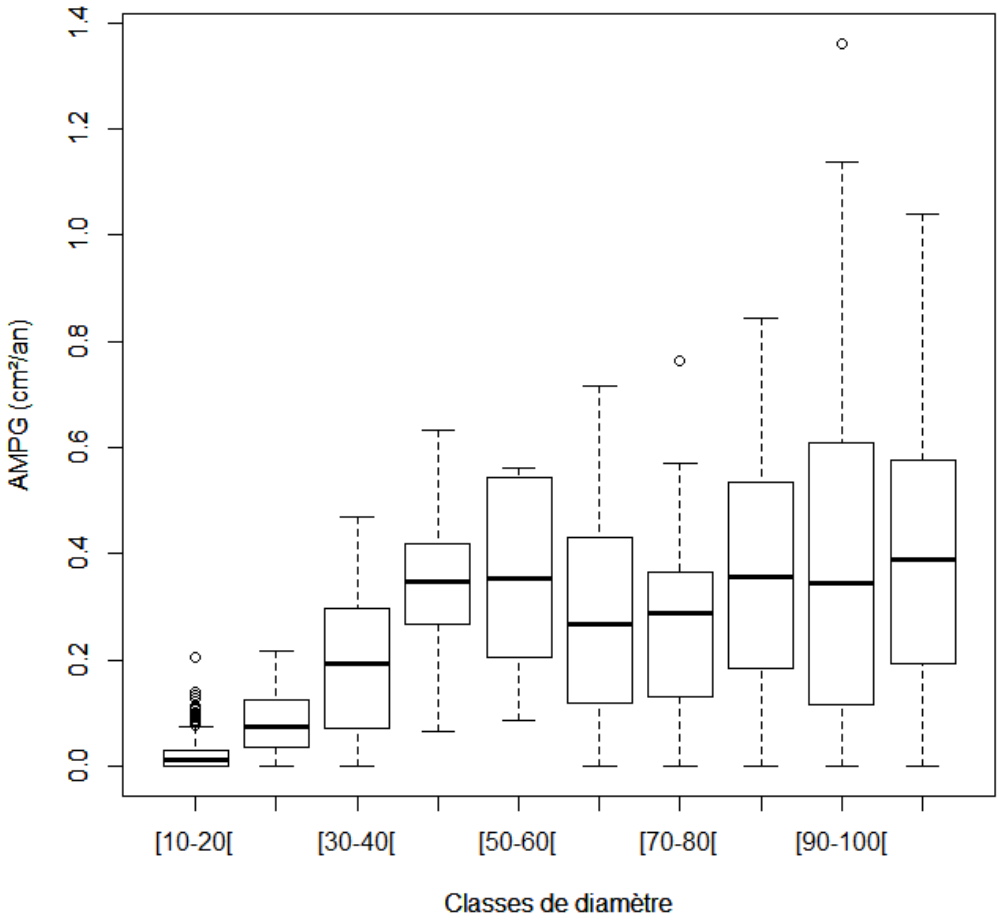


Figure A.5 – Distribution des accroissements moyens périodiques en G (cm^2/an) chez *P. elata* (médiane, quartiles inférieur et supérieur, limite supérieure et inférieure).

A.6 Relation entre le statut social et le diamètre des individus échantillonnés

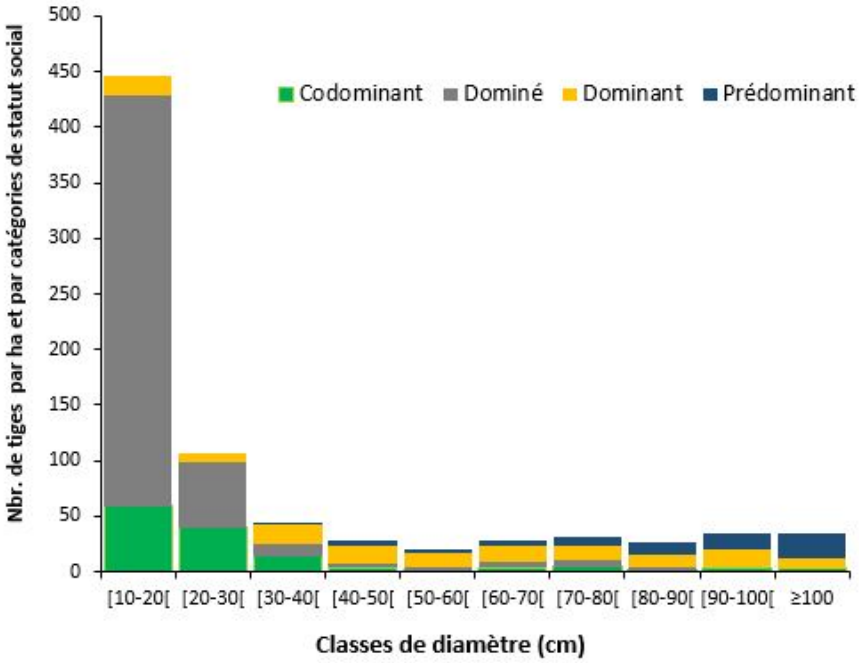


Figure A.6 – Proportions d'individus de *P. elata* par catégorie du statut social regroupées par classes de diamètre.

A.7 Modèles de croissance de *P. elata*

A.7.1 Détermination des valeurs initiales des paramètres du modèle

On veut

$\mathrm{AM}_{est} = \exp\left(a + b\ln D + c(\ln D)^2\right)$

On a

$$\mathrm{AM}_{est} = \mathrm{k1}\ \exp\left(-\left[k2\ln\left(\frac{k3}{D}\right)\right]^2\right)$$

$$= \exp\left(\ln k1 - [k2(\ln k3 - \ln D)]^2\right)$$

$$= \exp\left[\ln k1 - k2^2(\ln k3)^2 + 2k2^2\ln k3\ln D - k2^2(\ln D)^2\right]$$

$$= \exp\left[\ln k1 - k2^2(\ln k3)^2 + 2k2^2\ln k3(\ln D) - k2^2(\ln D)^2\right]$$

d'où

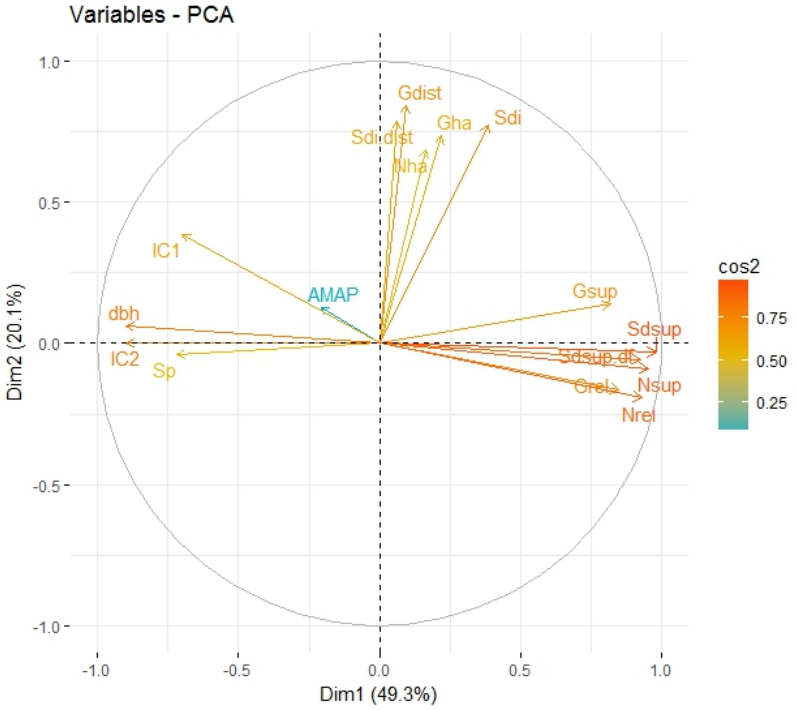
$$\begin{array}{lll} a = \ln k1 - k2^2(\ln k3)^2 & & \mathrm{k1} = \exp\left(a + k2^2(\log k3)^2\right) \\ \mathrm{b} = 2\mathrm{k}2^2\ln k3 & \Rightarrow & \mathrm{k2} = \text{- } \mathrm{c}^2 \\ c = \text{-k}2^2 & & \mathrm{k3} = \exp\left(\frac{b}{2k2^2}\right) \\ & & \mathrm{k4} = 0 \\ & & \mathrm{k5} = [1, -1] \end{array}$$

A.7.2 Statistiques descriptives des variables de compétition

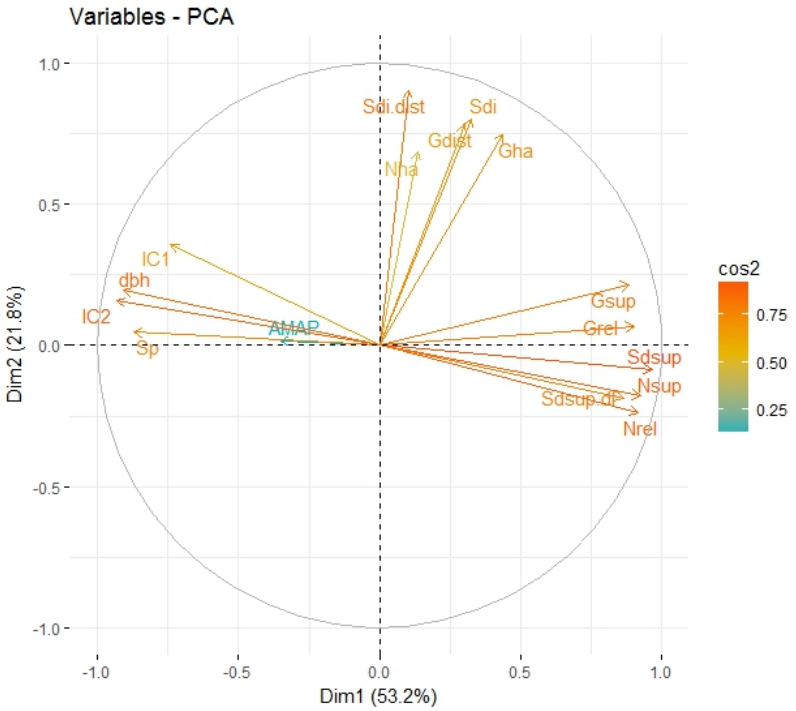
Tableau A.1 – Statistiques descriptives (minimum, maximum, moyenne et écart-type) des différentes variables du jeu de données décrivant le diamètre des arbres focaux, l'accroissement moyen annuel périodique et l'intensité de la compétition en forêt aménagée et non-aménagée à Yangambi.

Variables	Forêt aménagée				Forêt non-aménagée			
	MIN	MAX	MOY	ECT	MIN	MAX	MOY	ECT
D (cm)	12,70	120	59,50	29,51	10,7	125,50	61,48	31,27
AMAP (cm/an)	0,00	1,41	0,42	0,36	0,00	1,15	0,43	0,26
Gha (m^2/ha)	10,90	52,70	32,57	7,90	16,9	49,30	32,05	6,20
Sp (m^2)	23,6	483,5	174,6	118,48	14,8	546,20	215,43	154,44
Gdist (m/ha)	1,00	8,80	3,48	1,37	1,6	6,70	3,47	1,06
Gsup (m^2/ha)	0,00	46,20	14,66	11,40	0,00	37,60	11,14	10,29
Grel	0,00	1,80	0,45	0,36	0,00	1,10	0,33	0,00
Nha (tiges/ha)	207,7	638,6	432,8	67,43	261,5	569,20	417,38	58,41
Nsup (tiges/ha)	0,00	48,00	9,79	12,84	0,00	276,80	59,85	77,04
Nrel	0,00	369,20	75,36	98,77	0,00	0,60	0,14	0,18
Sdi	0,00	0,80	0,17	0,23	960,8	1935,20	1410,39	199,73
Sdi.dist	1027	1714	1447	174,00	87,6	233,60	151,64	31,95
Sdsup	103,1	353,8	159,4	51,58	0,00	1328,30	377,38	393,31
Sdsup.df	0,00	1499,9	431,5	422,75	0,00	102,20	14,68	22,76
IC1	3,90	56,40	19,56	12,22	3,2	63,10	19,13	13,16
IC2	0,50	5,00	2,29	1,20	0,4	1,23	4,70	2,38

A.7.3 Cercle de corrélation de l'ACP



(a)



(b)

Figure A.7 – Cercle de corrélation des variables de compétition : (a) en forêt aménagée et (b) en forêt non-aménagée. La qualité de la représentation d'une variables sur un axe factoriel est donnée par le $\cos^2$ de l'angle formé par ce dernier et l'axe. Plus $\cos^2$ est grand, plus la variables est bien représentée. Ces différentes variables sont décrites dans le tableau 2.3.

A.7.4 Représentation graphique des résidus du modèle diamétrique M1a en fonction des différents indices de compétition.

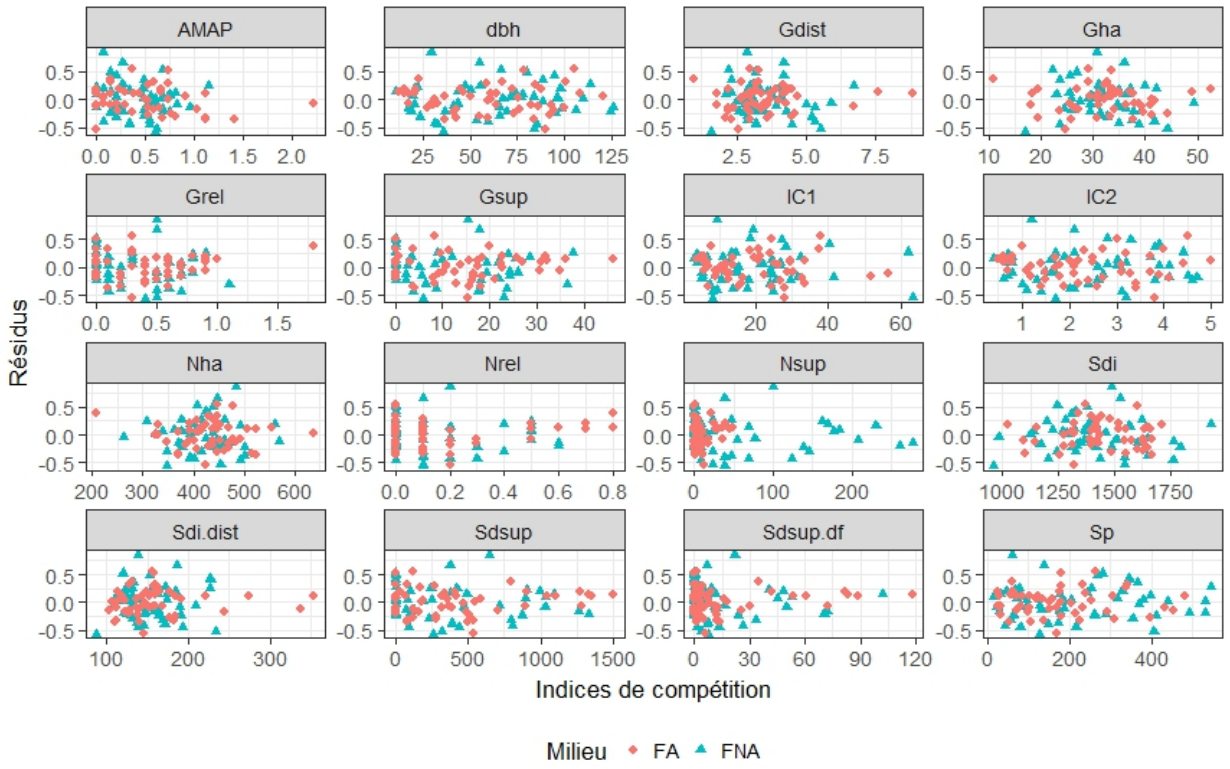
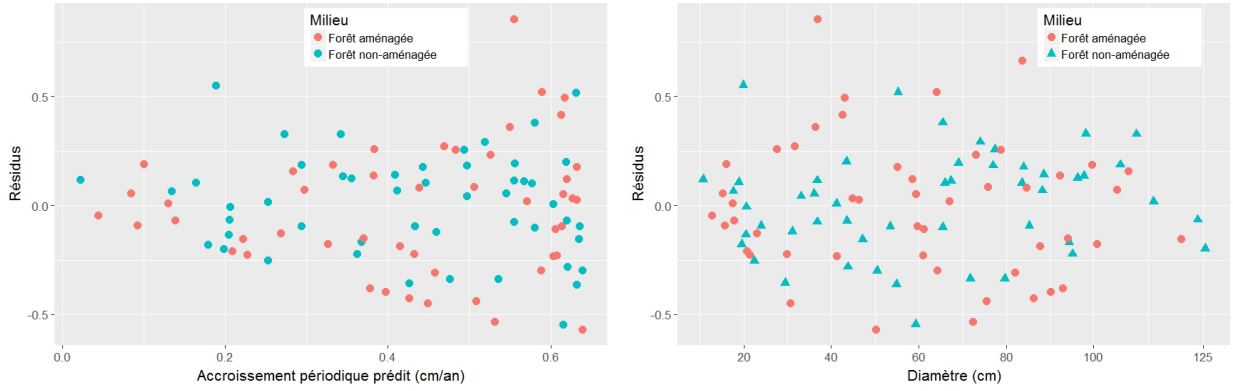


Figure A.8 – Représentation graphique des résidus du modèle diamétrique M1a en fonction des indices de compétition en forêt aménagée et non-aménagée, *cf.* tableau 2.3 pour la signification des symboles.

A.7.5 Distribution résiduelle du Modèle M1a



(a) (b)

Figure A.9 – Représentation graphique des résidus du modèle diamétrique M1a (a) en fonction de l'accroissement périodique en diamètre prédit (en cm/an), (b) en fonction du diamètre des arbres (en cm).

A.7.6 Distribution résiduelle des modèles M2a et M3a

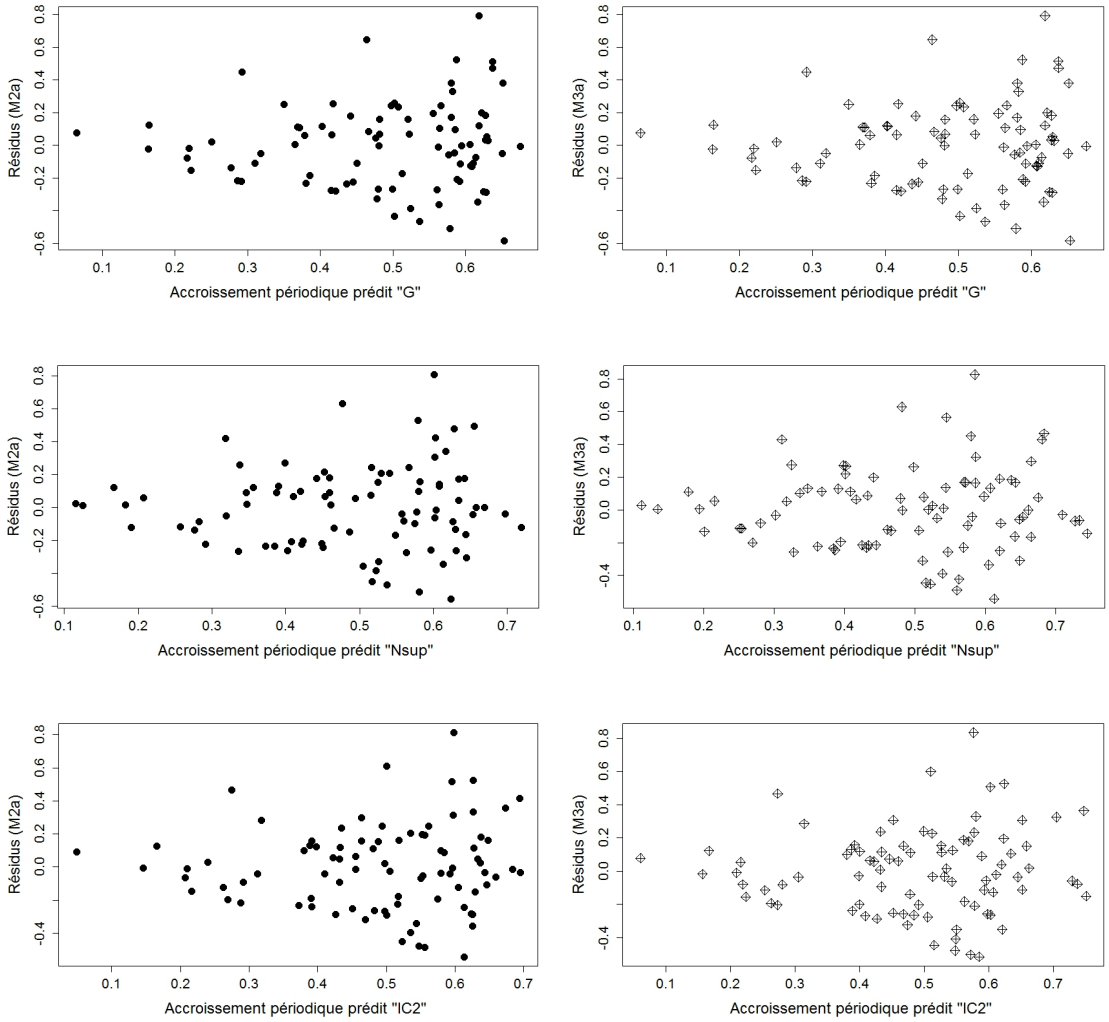


Figure A.10 – Représentation graphique des la distribution des résidus des modèles M2a et M3a en fonction des valeurs d'accroissements prédites pour chaque variable de compétition considérée (*cf.* tableau 2.3).

A.7.7 Représentation graphique des modèles diamétriques M1b et la distribution des résidus

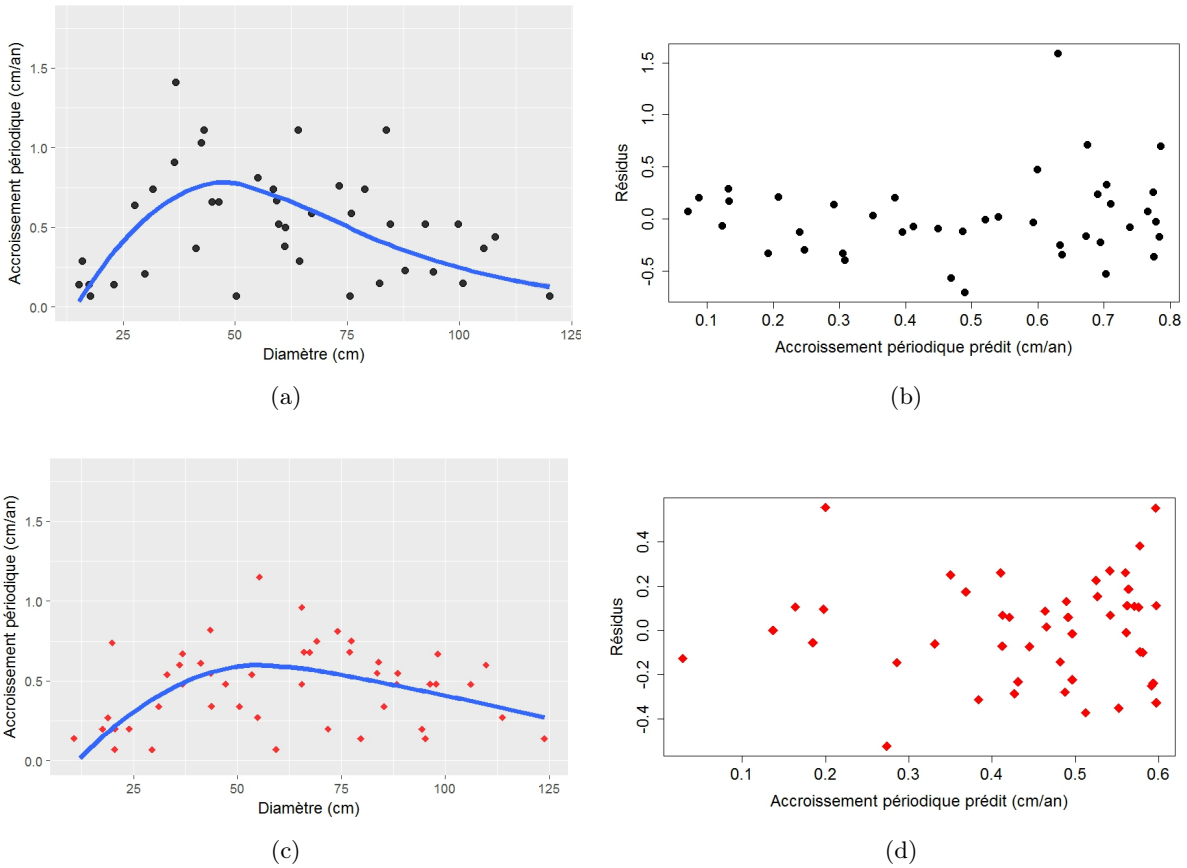
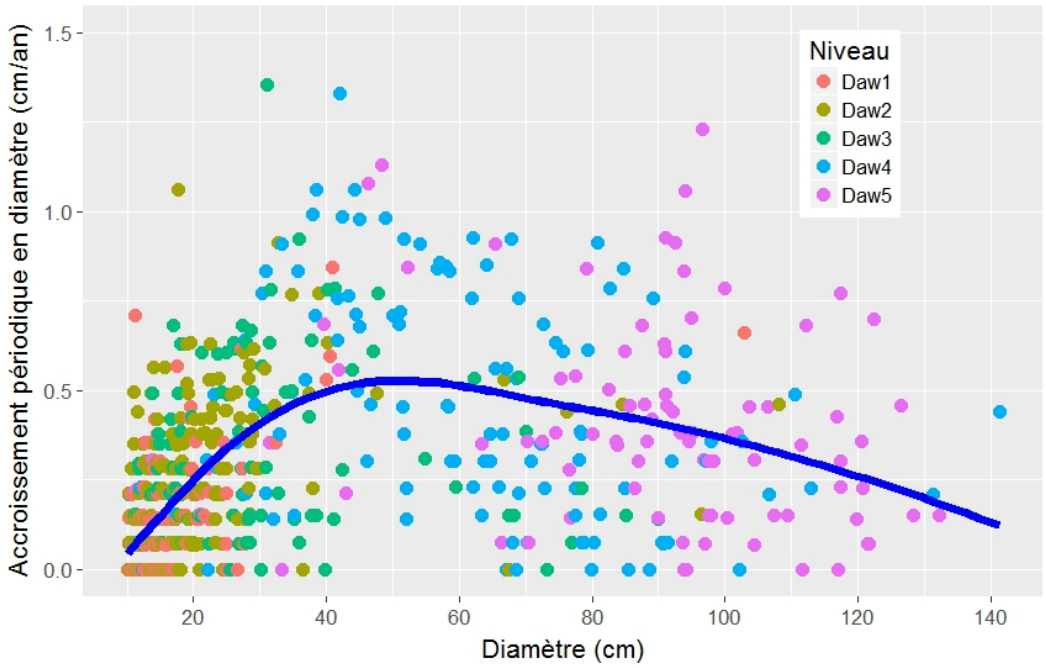
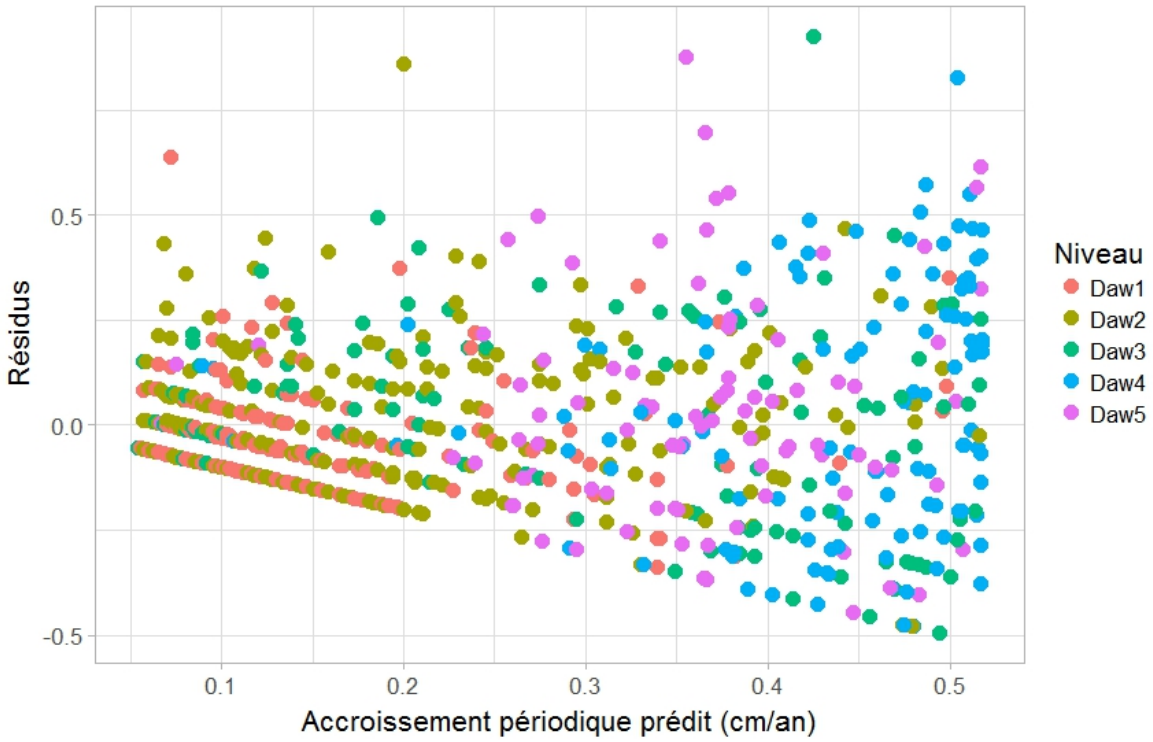


Figure A.11 – Représentation graphique de modèles diamétriques (M1b) (courbe bleue) reliant l'accroissement périodique théorique (en cm/an) au diamètre des arbres (en cm) : (a) en forêt aménagée et (c) en forêt non-aménagée, (b) et (d) présentent la distribution résiduelle respective de (a) et de (c) autour de zéro.

A.7.8 Représentation graphique du modèle diamétrique (M1c) issu du dispositif en layon et des résidus associés

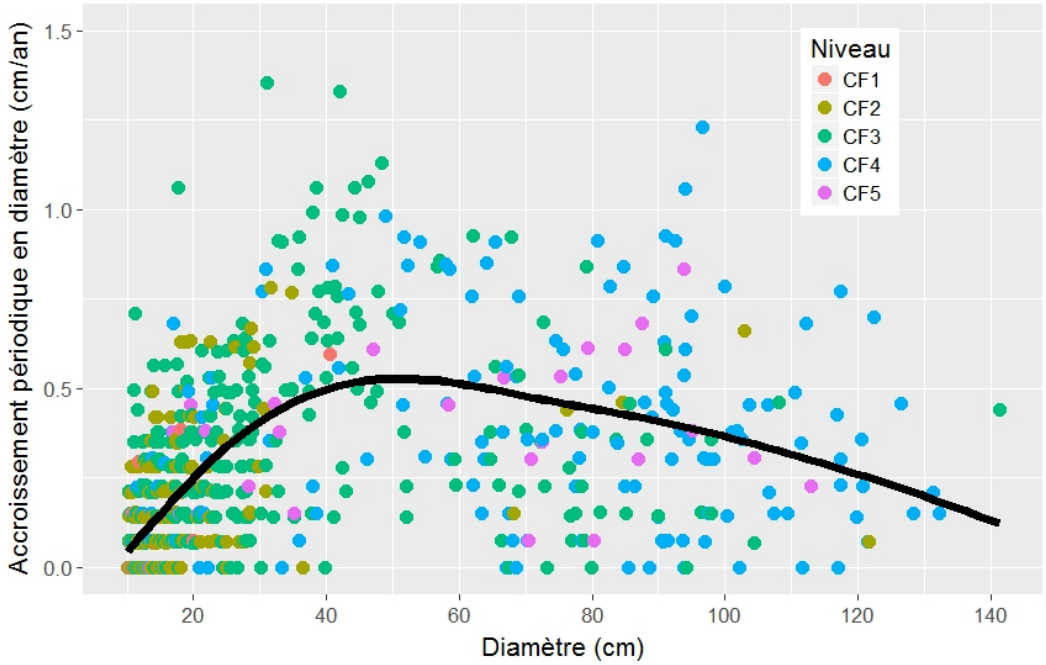


(a)

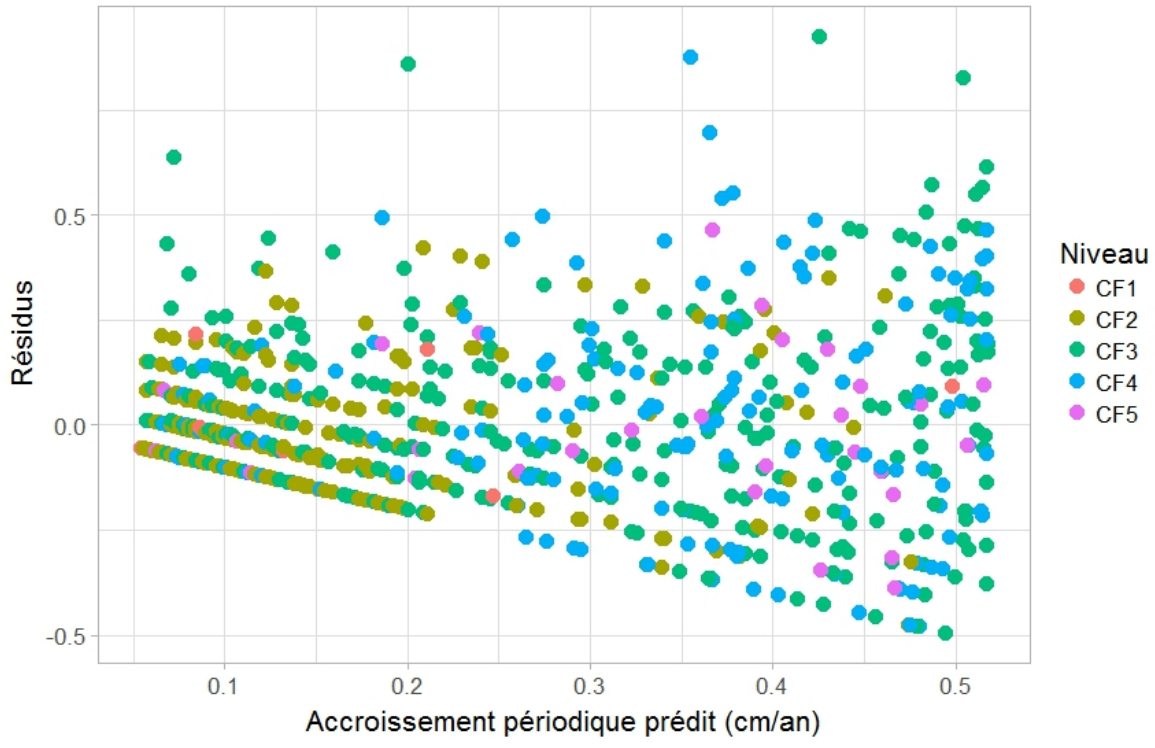


(b)

Figure A.12 – (a) Représentation graphique du modèle diamétrique M1c reliant l'accroissement périodique théorique (en cm/an) au diamètre des arbres (en cm) dans le dispositif en layon des blocs d'aménagement avec distinction des individus appartenant aux différents niveaux de l'indice de Dawkins (*cf.* tableau 2.4), (b) représente la distribution des résidus de ce modèle.



(a)



(b)

Figure A.13 – (a) Représentation graphique du modèle diamétrique M1c reliant l'accroissement périodique théorique (en cm/an) au diamètre des arbres (en cm) dans le dispositif en layon des blocs d'aménagement avec distinction des individus appartenant aux différents niveaux de l'indice de Van Daalen (*cf.* tableau 2.4), (b) représente la distribution des résidus de ce modèle.

Analyse rétrospective des impacts de différentes méthodes sylvicoles sur les performances de *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen (Yangambi-RDC)

Présenté par Brice Yannick Djiofack

Résumé Le présent travail réalisé entre février et mai 2018 à Yangambi (province de la Tshopo-RDC) emboîte le pas aux recherches en cours depuis quelques décennies en Afrique Centrale visant à améliorer les connaissances scientifiques sur l'écologie et la sylviculture de *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen, espèce tropicale à haute valeur commerciale. Cette espèce autrefois surexploitée souffre d'importants problèmes de régénération naturelle. Son aire de distribution naturelle s'étendant jadis du Ghana à la RDC est aujourd'hui disjointe. Considérée comme en « danger », elle est reprise sur la liste rouge de l'IUCN et inscrite depuis le 11 juin 1992 en Annexe II de la CITES. L'objectif global du travail visait à rassembler des informations scientifiques fiables sur les essais sylvicoles qui furent appliqués à cette espèces à Yangambi et sur ses conditions de croissance, afin de proposer des recommandations capables de promouvoir une exploitation durable et un traitement sylvicole répondant à ses exigences écologiques.

A cet effet, des recherches documentaires sur l'historique des activités sylvicoles concernant *P. elata* à Yangambi ont été réalisées dans différentes bibliothèques et centres de documentation en Belgique et à Yangambi. Celles-ci ont permis de décrire quelques-unes des méthodes sylvicoles testées par l'INEAC vers la fin des années 1940 et à l'origine de l'abondante régénération naturelle observable à ce jour dans les blocs d'aménagement de Yangambi. Ces essais sylvicoles consistaient essentiellement en des ouvertures du couvert forestier à des intensités variables autour des arbres semenciers.

Quelques paramètres dendrométriques ont été estimés. Dans une première étape, un inventaire systématique couplé aux mesures du dbh de toutes les tiges de *P. elata* a été effectué dans les blocs d'aménagement sur une surface d'environ 136,2 ha. Il ressort de cet inventaire, une densité de 6,4 tiges de *P. elata*/ha et une surface terrière totale de 0,9 m^2/ha. En comparant ces données à celles issues d'un inventaire de même type dans la forêt non-aménagée datant de septembre 2016, d'importantes différences de structure ont été mises en évidence. *P. elata* présente une structure de populations en forme de courbe en cloche en forêt non-aménagée qui contraste avec une structure en forme de « L » dans les blocs d'aménagement. Dans une seconde étape, l'analyse a porté sur la caractérisation de la dynamique forestière. Un taux de mortalité annualisé de 0,98 % a été enregistré. Un accroissement moyen annuel périodique de 0,24 $\pm$ 0,01 cm/an a été enregistré dans le dispositif d'inventaire systématique des blocs d'aménagement, contre 0,44 $\pm$ 0,06 et 0,44 $\pm$ 0,04 dans les circuits de suivi de la dynamique forestière en forêt aménagée et non-aménagée respectivement. Une variation importante des accroissements d'une classe de diamètre à l'autre a été notée. Chaque circuit consiste en une dizaine d'individus par classes de diamètre ([10-20[, [20-30[... $\geq$100 cm), dont le voisinage a été caractérisé à l'aide de placettes circulaires installées autour de 50 arbres-cibles échantillonnés dans chaque circuit.

Les données des placettes circulaires ont permis de modéliser la croissance de *P. elata* en intégrant le diamètre et des paramètres de la structure du peuplement pour exprimer l'intensité de la compétition. Le modèle log-normal avec le diamètre comme seule variable explicative de la variabilité résiduelle de l'accroissement s'est avéré plus performant dans ce cas que dans ceux intégrant les indices de compétition. Un autre modèle plus général intégrant le diamètre et un indice de compétition relatif à l'accès à la lumière a été ajusté aux données du dispositif d'inventaire systématique des blocs d'aménagement. Ce dernier permet de montrer l'influence significative de l'exposition de la couronne à la lumière sur la croissance de *P. elata*. L'allure générale de la courbe de croissance dans tous les cas montre une tendance unimodale.

Mots clés : Afromosia – Yangambi – Blocs d'aménagement – Sylviculture – Forêt tropicale humide d'Afrique Centrale - République Démocratique du Congo

Année académique 2017-2018

UCL Université catholique de Louvain

AGRO LOUVAIN BIOINGÉNIEURS