

MÉMOIRE

Présenté par : *HUSSON Justine*

Dans le cadre du

Master Sciences, Technologies, Santé

Mention : **Biodiversité, Écologie et Évolution**

Parcours : **Biodiversité végétale et Gestion des Écosystèmes Tropicaux**

Stage effectué du **05/02/2019** au **02/08/2019**.

À :

CIRAD

Département Environnements et Sociétés (ES) - UPR F&STA C-105 / D-Campus international de Baillarguet 34398 Montpellier - Cedex 5

Sur le thème :

Croissance des arbres et sa variabilité dans les forêts denses humides d'Afrique Centrale – Etude au nord de la République du Congo

Pour l'obtention du :

DIPLÔME NATIONAL DE MASTER

Enseignant/e-tuteur responsable de stage :

Stéphane TRAISSAC

Maîtres de stage :

Sylvie GOURLET-FLEURY

Eric FORNI

Vivien ROSSI

Soutenu le : **29/08/2019**

*Les opinions émises par les auteurs sont personnelles et n'engagent pas
AgroParisTech.*

CROISSANCE DES ARBRES ET SA VARIABILITÉ DANS LES FORÊTS DENSES HUMIDES DU BASSIN DU CONGO – ÉTUDE AU NORD DE LA RÉPUBLIQUE DU CONGO

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction | 1 |
| Les forêts d’Afrique centrale | 1 |
| Les plans d’aménagement forestier en Afrique centrale..... | 2 |
| Les dispositifs permanents en Afrique centrale | 3 |
| Les dispositifs permanents de la compagnie IFO | 4 |
| Matériel et méthodes | 7 |
| Présentation des dispositifs permanents de la compagnie IFO | 7 |
| La situation administrative et les décisions d’aménagement | 7 |
| Le milieu..... | 7 |
| Les dispositifs permanents : suivi dans l’espace et le temps | 9 |
| Analyses | 11 |
| Analyse de la composition floristique | 11 |
| Analyse de la croissance..... | 11 |
| Tests statistiques et modèles..... | 12 |
| Résultats | 17 |
| Etude de la structure diamétrique des peuplements | 17 |
| Etude de la composition floristique | 17 |
| Composition floristique du peuplement de chaque zone | 17 |
| Composition en espèces commerciales principales de chaque zone..... | 18 |
| Etude de la croissance | 19 |
| Croissance des arbres appartenant aux peuplements complets..... | 19 |
| Etude de l’effet de variables dendrométriques et environnementales sur la croissance des arbres appartenant aux peuplements complets..... | 22 |
| Croissance des arbres appartenant au groupe des espèces commerciales principales | 23 |
| Etude de l’effet de variables dendrométriques et environnementales sur la croissance des espèces commerciales principales | 27 |
| Discussion | 29 |
| Le sol et la densité du peuplement peuvent avoir un effet sur la croissance..... | 29 |
| La composition et la structure des peuplements changent avec les zones et peuvent influencer la croissance..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Mais la croissance change aussi avec le climat..... | 31 |
| L'exploitation forestière a stimulé la croissance, en fonction de son intensité et en interaction avec la zone et le climat | 32 |
| Les limites des dispositifs permanents de la compagnie IFO et de notre étude | 34 |
| Conclusion et perspectives..... | 37 |
| Bibliographie..... | 39 |
| Annexes..... | 45 |

Abréviations :

IFO : Industrie Forestière de Ouesso

OIBT : Organisation Internationale des Bois Tropicaux

UFA : Unité Forestière d'Aménagement

DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près comme de loin, au succès de ce stage et qui m'ont épaulé lors de la rédaction de ce mémoire.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mes trois encadrants de stage, Sylvie Gourlet-Fleury, Eric Forni et Vivien Rossi. Merci à Sylvie de m'avoir permis d'effectuer ce stage et pour la confiance accordée. Un grand merci pour le temps consacré -malgré un emploi du temps très chargé- les précieux conseils, les nombreuses connaissances apportées, les corrections très minutieuses et l'expérience partagée. Merci à Eric pour sa chaleureuse compagnie et ses compétences transmises sur le terrain. Merci à Vivien pour son aide précieuse en ce qui concerne la modélisation et les statistiques.

Je tiens également à remercier la compagnie IFO pour son accueil au Congo. Je remercie en particulier Antoine Couturier et Tom Van Loon pour l'excellente organisation de mon séjour et des missions de terrain ainsi que leurs réponses à mes nombreuses questions. Je remercie aussi toute l'équipe d'inventaire pour leurs connaissances et anecdotes sur la vie en forêt tropicale.

Merci aux stagiaires, doctorants et chercheurs de l'unité pour leur bonne humeur quotidienne mais également pour les services que chacun a pu me rendre.

Enfin, je tiens à remercier tous mes proches pour leur soutien indéfectible tout au long de mes études et de ce stage.

INTRODUCTION

Les forêts d'Afrique centrale

Les forêts d'Afrique centrale constituent le deuxième plus grand massif mondial de forêts denses tropicales humides et couvrent plus de 250 millions d'hectares (CIRAD 2014; FAO 2015; FFEM 2011; Wasseige et al. 2015). Elles représentent ainsi 70% du couvert forestier du continent africain (FFEM 2011). Ce massif forestier s'étend du golfe de Guinée à l'ouest, à la vallée du Rift à l'est (Wasseige et al. 2015). Les forêts d'Afrique centrale sont composées de 59% de forêts denses humides, de 23% de forêts sèches, de 4% de forêts inondées et de 15% de « forêts mosaïque », c'est-à-dire d'un mélange de forêts et d'autres terres, où les îlots de forêts sont fragmentés et difficiles à classer séparément (FAO 2011; Wasseige et al. 2015).

Comme la plupart des forêts tropicales, ces forêts sont confrontées à des pressions anthropiques entraînant la conversion des terres, l'exploitation minière mais aussi l'exploitation du bois (CIRAD 2014). Pour un volume sur pied total de 57 714 millions de m³ en Afrique centrale (soit environ 210 m³/ha), près de 8 millions de m³ de grumes destinées au bois d'œuvre ont été produits annuellement par le secteur forestier industriel depuis 1997 (FAO 2015; OIBT 2017). On accuse l'exploitation, en particulier pour le bois d'œuvre, d'être à l'origine de la dégradation des forêts pour deux raisons. En premier lieu, elle favorise la pénétration du massif forestier par les agriculteurs et les chasseurs, à travers la création d'infrastructures (Kleinschroth et al. 2015). En second lieu, elle appauvrit les canopées suite à la récolte répétée de grands arbres de valeur en fonction des demandes des marchés (CIRAD 2014). En effet, l'exploitation forestière a longtemps été une activité mal réglementée, entièrement dépendante des contraintes économiques et peu soucieuse de la durabilité (Gourlet-Fleury et al. 2013). De plus, tout le massif forestier est sujet à une exploitation illégale dont l'impact sur les forêts vient s'ajouter à celui de l'exploitation légale (Wasseige et al. 2015).

La prise de conscience grandissante des risques encourus par les forêts denses humides a conduit la plupart des pays d'Afrique centrale à redéfinir, entre 1990 et 2002, leur législation forestière et à rendre obligatoire la mise en place de plans d'aménagement dans les forêts de production dans le but de dépasser l'opposition entre conservation et exploitation qui prévalait dans les années 70 (CIRAD 2014; Gourlet-Fleury et al. 2013; Grimaud 2012; Wasseige et al. 2014). Aujourd'hui, seulement 24 millions d'hectares de forêts disposent d'un tel plan d'aménagement, sur les 49 millions d'hectares attribués à des concessionnaires forestiers (ATIBT 2016). A cela vient s'ajouter la certification de la gestion forestière, introduite à la fin des années 1990, comme outil volontaire pour valoriser les filières d'exploitation forestière durable à l'international et pour promouvoir les produits issus de forêts gérées durablement (FAO 2016; Forest Stewardship Council 2018; Grimaud 2012). Deux programmes de certification internationaux émergent : le Forest Stewardship Council (FSC) et le Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC). En 2016, 18% des concessions forestières étaient certifiées dans le Bassin du Congo, soit 8,9 millions d'hectares de forêts, dont 5,6 millions certifiées FSC (ATIBT 2016).

Les plans d'aménagement forestier en Afrique centrale

Les plans d'aménagement des concessions forestières sont des instruments essentiels qui doivent être compatibles avec la gestion durable des forêts (Gourlet-Fleury et al. 2013). Tel que défini par l'Organisation internationale des bois tropicaux, l'aménagement forestier durable est « un processus consistant à aménager une forêt en vue d'objectifs clairement définis concernant la production soutenue de biens et de services désirés sans porter atteinte à leur valeur intrinsèque ni compromettre leur productivité future, et sans susciter d'effets indésirables sur l'environnement physique et social » (OIBT 2005; 2016).

En Afrique centrale, l'exploitation forestière sélective (un à deux arbres par ha⁻¹ et parfois moins à chaque passage) est la plus largement pratiquée pour la production commerciale de bois (Gourlet-Fleury et al. 2013; Picard, Gourlet-Fleury, et Forni 2012; Wu et al. 2013). Toutefois, les exploitants ne suivant pas un plan d'aménagement, et incités par les débouchés commerciaux, effectuent des entrées répétées entraînant une réduction du stock d'arbres commerciaux et par conséquent des dommages importants aux peuplements (Gourlet-Fleury et al. 2013; CIRAD 2014). Les entreprises qui abandonnent leurs concessions le font notamment parce que les volumes et la qualité de leurs espèces phares, comme par exemple l'azobé (*Lophira alata*), le sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) ou encore l'ayous (*Triplochiton scleroxylon*), diminuent fortement (Groutel 2018). C'est pourquoi les efforts de préservation doivent être axés sur l'amélioration de l'exploitation forestière (plutôt que sur son interdiction), par la mise en place de plans d'aménagement « durable » dans la totalité des forêts sous concession (Demenois et al. 2003; Gourlet-Fleury et al. 2013). Il a d'ores et déjà été observé qu'à production égale, les concessionnaires suivant un plan d'aménagement engendrent deux fois moins de déforestation brute que les concessionnaires non-aménagés (Karsenty et al. 2016). En effet, la vocation de ces concessions aménagées est de produire du bois d'œuvre, sous contrainte de la reconstitution des stocks au cours d'une rotation (temps de passage entre deux coupes), qui est fixée, et du capital forestier en général. De plus, au sein même des concessions aménagées, des séries de protection et de conservation sont juxtaposées aux espaces productifs (Karsenty et al. 2016).

Une concession aménagée doit s'assurer que la structure et la composition floristique ne seront pas modifiées de manière significative par les opérations d'abattage (Karsenty et Gourlet-Fleury 2006). Une diversification des espèces exploitées est donc prescrite. De plus, les exigences légales requièrent d'atteindre des taux minima de reconstitution (proportion du nombre de tiges exploitables en 2^{ème} rotation par rapport au nombre de tiges exploitables en 1^{ère} rotation) de la ressource afin d'éviter une baisse des volumes récoltés (IFO et Foret Ressources Management 2015; Karsenty et al. 2016). Les plans d'aménagement prévoient ainsi le volume exploitable en fonction de la possibilité de la forêt, c'est-à-dire la reconstitution en gros bois (arbres de diamètre supérieur au diamètre minimum d'aménagement) durant une rotation (Picard 2007). C'est pourquoi des diamètres minima sont définis pour garantir, en partie, la reconstitution des stocks exploités. Par ailleurs, ces diamètres minima favoriseront la préservation d'un nombre de semenciers plus important : la composition des forêts aménagées sera à terme moins déséquilibrée que dans les forêts exploitées sans aménagement (Karsenty et al. 2016). Le Diamètre Minimum d'Exploitation (DME) est le diamètre minimum, fixé par la réglementation, à partir duquel un arbre peut être coupé (Bernard 2013; IFO et Foret Ressources Management 2015). Tandis que le Diamètre Minimum d'Aménagement (DMA) est le diamètre minimum fixé lors de la rédaction du plan d'aménagement. Ce dernier est propre à chaque concession et est toujours supérieur au DME. Etant calculé en fonction du peuplement il est nécessaire de

connaître la structure et la dynamique au sein de la concession avant de le fixer (IFO et Forêt Ressources Management 2015).

Un plan d'aménagement qui se veut « durable » doit donc reposer sur de bonnes connaissances de la dynamique forestière. En effet, le calcul de la possibilité et du taux de reconstitution du stock exploitable nécessitent de connaître d'une part l'état initial du peuplement et d'autre part de quantifier les processus de la dynamique forestière que sont la croissance, la mortalité et, pour des prédictions à plus long terme, le recrutement (nombre d'arbres qui franchissent chaque année le seuil de précomptage de 10 cm de diamètre), et ce aussi bien en conditions non perturbées qu'après perturbation (Demenois et al. 2003; Picard 2007; Picard et Gourlet-Fleury 2008). La quantification de ces processus permet de prévoir la réaction des espèces aux perturbations, leur contribution relative à la communauté mais permet également d'utiliser des modèles de dynamique forestière pour simuler l'évolution du stock de bois en fonction de différents scénarios de prélèvement. Cette quantification est donc indispensable pour garantir une gestion et un aménagement durable (Carreño-Rocabado et al. 2012; CIRAD 2014; Win, Suzuki, et Takeda 2012). Cependant, une des limites actuelles des plans d'aménagement en Afrique centrale est liée à un déficit de connaissances sur la dynamique forestière (Picard 2007; Picard et Gourlet-Fleury 2008; Ligot et al. 2019). Ainsi, il est essentiel de mettre en place des dispositifs de suivi permanents de cette dynamique pour pallier ce manque de base.

Les dispositifs permanents en Afrique centrale

Par dispositif permanent on entend tout dispositif forestier où les arbres sont marqués individuellement, de façon durable, permettant ainsi de les remesurer à intervalles de temps réguliers (Picard 2007; Picard et Gourlet-Fleury 2008). Seuls des dispositifs permanents, mettant en œuvre un gradient de perturbation lié à l'exploitation forestière, peuvent fournir les données nécessaires à la quantification de la dynamique forestière en vue de préciser les paramètres de l'aménagement forestier, avec un enjeu de gestion durable. Or, de tels dispositifs sont très rares dans les forêts africaines (CIRAD 2014).

Parmi les dispositifs toujours actifs aujourd'hui, les plus anciens (M'Baïki en République Centrafricaine, La Lopé au Gabon) ont été installés au début des années 80. On dispose donc sur ces dispositifs d'un recul de 35 ans actuellement. Le dispositif de M'Baïki a été installé en 1982 avec pour objectif de quantifier l'impact de l'exploitation et de traitements sylvicoles sur la dynamique forestière (Bedel et al. 1998; Ouedraogo 2008; Picard 2007; Picard et Gourlet-Fleury 2008). Ses données ont ainsi servi de base au calage des paramètres de l'aménagement dans de nombreuses concessions forestières (CIRAD 2014).

Cependant, des données pertinentes pour l'ensemble des forêts d'Afrique centrale ne peuvent pas provenir d'un seul et même dispositif. En effet, si l'intensité des perturbations a une grande influence, les caractéristiques environnementales jouent également. En Afrique centrale il existe une grande variété de types forestiers sous la dépendance, en particulier, de la nature du substrat géologique et des conditions climatiques locales (CIRAD 2014; Condit et al. 2013; Fayolle et al. 2014; Ligot et al. 2019; Maley 1990). Il a déjà été établi que la température, les précipitations (humidité et sécheresse) et le rayonnement solaire sont des variables qui ont un effet sur la structure, la dynamique et la composition des peuplements forestiers (Aubry-Kientz et al. 2019; Claeys 2018; Groenendijk et al. 2015; Lewis et al. 2009; Philippon et al. 2019). Néanmoins, par manque de mesures in situ, les conditions climatiques dans lesquelles les forêts poussent en

Afrique centrale ne sont pas encore bien connues (Philippon et al. 2019) et par conséquent les effets de leurs changements sur la dynamique forestière non plus. Ayant des compositions floristiques, fonctionnelles et des structures en classe de taille différentes, il est probable qu'ils présentent des capacités de réaction aux perturbations différentes, nécessitant une adaptation spécifique des règles d'aménagement. Il est fondamental de mettre en place des dispositifs permettant de quantifier la réaction de ces différents types de forêts à l'exploitation, ce que très peu de concessionnaires font (CIRAD 2014; Groenendijk et al. 2015).

Les dispositifs permanents de la compagnie IFO

Depuis 2002, en République du Congo, IFO fait partie de ces rares compagnies forestières ayant mis en place, dans leur UFA (ici l'UFA Ngombé), des dispositifs permanents dans différentes zones, sujettes à l'exploitation ou non. Leur objectif principal est d'étudier et de distinguer les effets de l'environnement et de l'exploitation sur la dynamique forestière mais aussi de mieux caractériser l'accroissement de certaines essences, en particulier les essences commerciales et les essences rares ou menacées comme l'Afromosia (*Pericopsis elata*) (Couturier et Van Loon 2008). Ces dispositifs disposent aujourd'hui d'un recul dans le temps suffisamment important pour que la dynamique observée reflète les fluctuations décennales de facteurs climatiques comme la température ou encore la pluviométrie mais aussi les cycles de perturbation de la forêt.

La compagnie IFO est l'une des compagnies forestières qui sont devenues partenaires du projet P3FAC. Ce projet, initié en 2017 et dont le bailleur principal est le FFEM, pérennise les activités du projet DynAffFor qui s'achèvera fin 2019 (ATIBT 2016; « P3FAC » s. d.). Les trois objectifs principaux de ce projet sont : (1) améliorer les connaissances techniques et scientifiques sur la dynamique forestière, (2) améliorer les outils d'aide à la décision en matière d'aménagement forestier, via un réseau de sites de suivi de la dynamique forestière et une base de données et (3) mobiliser les acteurs pour améliorer les pratiques d'aménagement (CIRAD 2014). Les dispositifs permanents de la compagnie IFO s'inscrivent donc parfaitement dans ce projet.

En 2013, un premier bilan de la dynamique forestière a été réalisé au sein des dispositifs permanents de la concession IFO (Bernard 2013). Ce bilan a porté sur les trois premières campagnes d'inventaire réalisées et a permis notamment de conclure que : (1) les peuplements suivis dans la concession d'IFO, situés dans différents environnements, ont des structures et des dynamiques différentes ; (2) après exploitation, la croissance augmente avec l'intensité de la perturbation occasionnée ; (3) par ailleurs, quelle que soit la zone, l'exploitation n'a aucun effet visible sur la diversité des peuplements.

Le présent travail a pour objectif de quantifier les effets de l'environnement et de l'exploitation sur les paramètres de la dynamique forestière des dispositifs permanents d'IFO. Pour cela, les analyses faites par (Bernard 2013) seront poursuivies et les données issues d'une 4^{ème} campagne d'inventaire seront incluses. L'effort portera tout particulièrement sur la croissance. La modélisation de la croissance des arbres tropicaux est un objectif important pour prévoir la réponse de la dynamique des arbres à une exploitation sélective, les accroissements diamétriques représentant une mesure intégrée de cette réponse (Herault et al. 2010). De plus, de nombreux facteurs environnementaux interagissent et affectent la croissance des arbres, permettant ainsi de mieux comprendre les processus écologiques qui structurent les communautés d'arbres (Ligot et al. 2019).

Nous répondrons aux questions suivantes :

(1) Quels sont les effets de l'environnement sur l'accroissement des arbres dans la concession forestière de la compagnie IFO ?

(2) Quels sont les effets de l'exploitation forestière sur ces accroissements ?

- Sont-ils variables entre les différents types forestiers présents dans plusieurs zones de la concession ?
- Diffèrent-ils entre les espèces d'intérêt commercial ?
- Changent-ils en fonction de l'intensité d'exploitation ?
- Existe-t-il une relation entre l'environnement et l'exploitation affectant l'accroissement des arbres ?

Cette étude permettra dans un premier temps d'obtenir une connaissance affinée de la croissance des arbres de différents types forestiers mais également d'un certain nombre d'espèces commerciales, tout en croisant les effets de l'environnement et des perturbations liées à l'exploitation forestière. Dans un second temps elle permettra de réaliser un bilan global de ces dispositifs permanents, suivis depuis de nombreuses années, afin de discuter de leurs avantages ainsi que de leurs inconvénients.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation des dispositifs permanents de la compagnie IFO

La situation administrative et les décisions d'aménagement

Les dispositifs de suivi permanents, sur lesquels repose notre étude, sont situés dans l'UFA Ngombé, entre les latitudes 0°27' et 1°48' Nord et les longitudes 15°20' et 16°38' Est. L'UFA Ngombé fait partie du domaine forestier privé de l'Etat, et est localisée dans la zone II (Sangha) du secteur forestier Nord. Elle a été attribuée à la Société IFO (filiale Congolaise du Groupe DANZER) par la signature du contrat de Transformation Industrielle des Bois avec le Gouvernement Congolais le 14 décembre 1999 (IFO et Foret Ressources Management 2015). La Société IFO, suite à la signature de ce contrat, avait donc l'obligation (Loi n° 16-2000 du 20 novembre 2000 du code forestier du nouveau cadre législatif congolais) de réaliser un plan d'aménagement. Celui-ci fut élaboré de mars 2001 à juillet 2004 (période durant laquelle s'est déroulé l'inventaire d'aménagement) et publié en 2007. En 2009, la concession forestière de la Société IFO a également obtenu la certification selon les directives du Forest Stewardship Council (FSC). La certification FSC garantit que la concession forestière de la compagnie IFO est gérée dans le respect de la forêt et des droits des personnes qui vivent au sein de la concession. L'UFA Ngombé, couvrant une superficie de 1,16 millions d'hectares, est la plus grande concession en Afrique ayant obtenu jusqu'à maintenant la certification FSC (Lorent 2016).

Sur ces 1,16 millions d'hectares, quatre séries d'aménagement ont été créées. 800 000 hectares sont dédiés à la série de production (69 % de la surface totale), la superficie restante étant consacrée à la protection (19 %), à la conservation (7,5 %) et au développement communautaire (4,1 %). L'inventaire d'aménagement est un inventaire multi-ressources, prenant en compte les arbres (de diamètre supérieur à 50 cm et d'avenir, de diamètre supérieur à 20 cm), la faune et les Produits Forestiers Non Ligneux (PFNL) afin de déterminer les ressources forestières exploitables (IFO et Foret Ressources Management 2015). Au total 276 espèces d'arbres ont été recensées et une liste de 28 espèces commerciales principales a été définie (Annexe 1). Le plan d'aménagement établit également un programme prévisionnel de coupe des arbres. L'UFA est ainsi divisée en six grandes zones (Figure 1) qui seront exploitées une à une pendant 5 ans. La durée totale de la rotation de coupe est donc de 30 ans. La société IFO applique un système d'exploitation sélectif (environ 0,6 arbre par hectare ou 6 m³ par hectare abattu) (Brouwer 2017). Pour les 28 espèces commerciales principales exploitées (Annexe 1), les diamètres minimum d'aménagement (DMA) appliqués par IFO sont de 10 à 30 cm plus élevés que les diamètres requis par la loi forestière de la République du Congo afin de garantir un taux de reconstitution des stocks de 55 % (défini par des calculs prévisionnels lors de la rédaction du plan d'aménagement). De plus, un diamètre maximal a été défini par la société afin que les arbres dont le diamètre est égal ou supérieur à 2 mètres ne soient pas coupés (Brouwer 2017; IFO et Foret Ressources Management 2015).

Le milieu

L'UFA Ngombé est soumise à un climat équatorial semi-humide. Ce climat est caractérisé par deux saisons sèches (de mi-décembre à mi-mars et de début juin à mi-août) et deux saisons pluvieuses (de mi-mars à début juin et de mi-août à mi-décembre) par an.

Carte d'aménagement

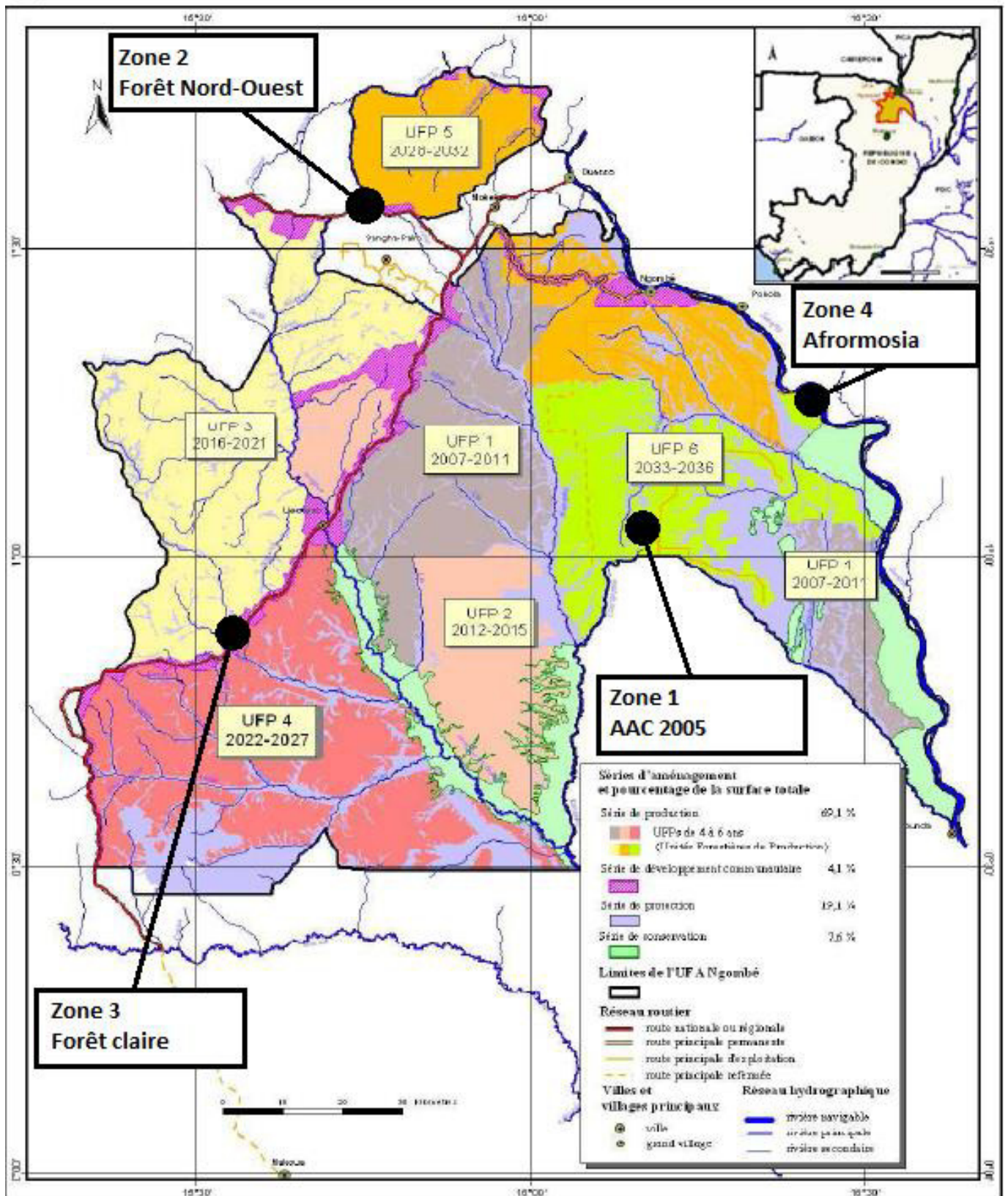


Figure 1 : Situation géographique de l'UFA Ngombé et localisation des quatre zones de parcelles permanentes dans les différentes assiettes de coupe prévisionnelles (figure adaptée de IFO et Forêt Ressources Management, 2015).

La température moyenne annuelle est de 26,1°C. De 2002 à 2017 la pluviométrie moyenne annuelle a été de 1750 mm (IFO et Forêt Ressources Management 2015; Huntington et al., s. d.).

Dans son ensemble, excepté de rares espaces non forestiers, l'UFA Ngombé est couverte par des forêts humides mixtes semi-décidues sur terre ferme et des formations forestières de type forêts marécageuses inondées en permanence et forêts inondées périodiquement. Dans l'espace forestier sur terre ferme deux grands ensembles se distinguent nettement : des forêts denses d'une part et des forêts claires à Marantacées d'autre part (IFO et Forêt Ressources Management 2015).

Les dispositifs permanents : suivi dans l'espace et le temps

Afin de suivre l'évolution de la dynamique des arbres, en fonction de l'environnement et de l'exploitation, quatre dispositifs de suivi permanents ont été installés dans quatre zones bien distinctes de l'UFA Ngombé (Tableau 1, Figure 1). Par la suite, le terme « zone » désignera le dispositif qui s'y trouve.

Tableau 1 : Caractéristiques environnementales et densité du peuplement des quatre zones de dispositif permanent (CIRAD 2014; Couturier et Van Loon 2008)

| <i>Zones</i> | <i>Elévation</i> | <i>Environnement</i> | <i>Type de sol</i> | <i>Densité d'arbres initiale</i> |
|--|------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|
| Zone 1 (UFP 6) AAC 2005 | 374 à 456 m | Zone de plaine marécageuse | Ancienne terrasse alluviale – Sols gréseux | 219.7 tiges/ha |
| Zone 2 (UFP 5) Forêt Nord-Ouest | 342 à 504 m | Zone de colline et pénéplaine | Sols schisto-calcarogréseux | 431.0 tiges/ha |
| Zone 3 (UFP 3) Forêt claire | 419 à 496 m | Zone de colline et pénéplaine | Sols schisto-quartzitiques | 28.5 tiges/ha |
| Zone 4 (UFP 6) Afromrosia | 278 à 362 m | Zone de plaine marécageuse | Sols sur alluvions, inondables | 434.0 tiges/ha |

Chaque dispositif repose sur un ou plusieurs blocs de 9 hectares (300m x 300m) (Tableau 2). Un bloc est entouré d'une zone tampon de 100 m de large où aucun abattage n'a lieu. Ce bloc contient 9 placettes de 1 hectare (Figure 2). Sur ces 9 placettes, 2 (sauf cas particulier de la zone Afromrosia, Tableau 2) font l'objet d'un inventaire systématique de tous les arbres dont le DHP est supérieur à 10 cm, quelle que soit l'espèce. Dans les 7 autres placettes, seuls les arbres appartenant aux 28 essences commerciales principales, et dont le DHP est supérieur à 10 cm sont inventoriés (Figure 2). Dans ces deux types de placettes, les arbres ont donc été identifiés botaniquement, géo-référencés et mesurés par un prospecteur. Chaque arbre est également marqué avec de la peinture pour garantir son suivi à long terme.

Le diamètre des arbres a été mesuré à 1,3 mètre de hauteur ou 30 cm au-dessus des contreforts (dans ce cas, la hauteur de mesure est notée dans la base de données). Chaque mesure s'effectue au millimètre près à l'aide d'un ruban. Dans le cas où le diamètre se situe dans l'intervalle du millimètre, la mesure est considérée au millimètre inférieur. Pour certains arbres le diamètre a été « estimé » car sa mesure était trop compliquée (très gros arbres ou contreforts).

Tableau 2 : Organisation spatiale et temporelle du dispositif expérimental de la compagnie IFO (adapté de Bernard 2013).

| Zones | Bloc | Placettes totalement inventoriées | Placettes où seules les 28 espèces principales sont inventoriées | Intensité d'exploitation * | Année campagne 1 | Année d'exploitation | Année campagne 2 | Année campagne 3 | Année campagne 4 |
|----------------------------|------|-----------------------------------|--|--|------------------|--|------------------|------------------|------------------|
| Zone 1 AAC 2005 | 1 | 37 et 45 | 38 à 44 | 37 : 3 tiges/ha 45 : 1 tige/ha | 2005 | 2005 | 2006 | 2010 | 2017 |
| | 2 | 46 et 63 | 56 à 62 | - | | - | | | |
| | 3 | 47 et 55 | 48 à 54 | 47 et 55 : 0 tige/ha ** | | 2005 | | | |
| Zone 2 Forêt Nord-Ouest | 1 | 64 et 72 | 65 à 71 | - | 2005 | - | 2007 | 2009 | 2016 |
| Zone 3 Forêt claire | 1 | 28 et 36 | 29 à 35 | - | 2005 | - | 2007 | 2008 | 2016 |
| Zone 4 Afrormosia | 1 | 3 | 1 à 9 | - | 2002 | - | 2006 | 2010 | 2017 |
| | 2 | 12, 13 et 15 | 10 à 18 | 13 : 0 tige/ha 12 et 15 : 1 tige/ha | | 2003 | | | |
| | 3 | 24, 25 et 27 | 19 à 26 | 24 : 9 tiges/ha 25 : 1 tige/ha 27 : 5 tiges/ha | | 24, 25 et 27 : 2003*** 19 à 26 : 2002 | | | |

* Uniquement notée pour les placettes totalement inventoriées.

** Aucun arbre n'a été abattu dans ces deux placettes mais de l'exploitation a eu lieu dans les autres placettes du bloc : ce ne sont pas des témoins.

*** Les placettes 25 et 27 ont été exploitées avant même la première campagne d'inventaire.

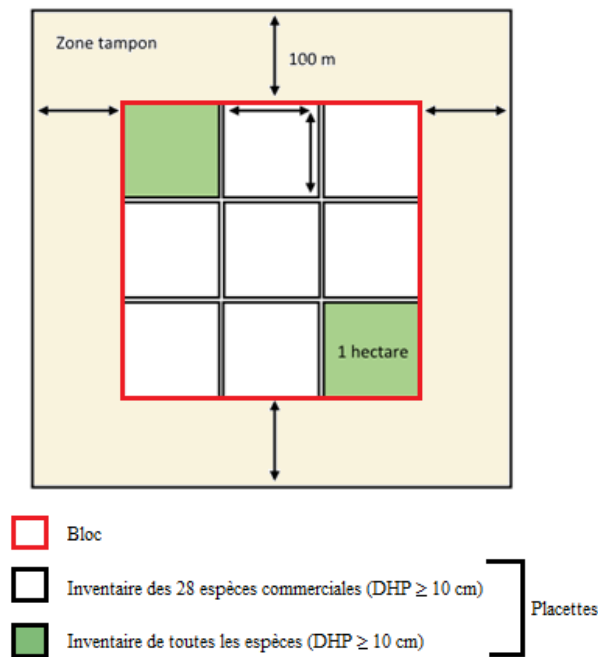


Figure 2 : Représentation d'un bloc de 9 placettes inventoriées et de sa zone tampon (figure adaptée de Bernard 2013)

Au total, chaque zone a été inventoriée quatre fois (campagnes 1, 2, 3 et 4). D'une zone à l'autre, les dates des campagnes d'inventaire varient (Tableau 2, Figure 3). Par exemple la campagne 1 de la zone Afrormosia a eu lieu en 2002 alors que celle des autres zones a été effectuée en 2005 (Tableau 2, Figure 3). Nous pouvons parler ici d'étude diachronique puisque les inventaires ont débuté sur des zones non perturbées qui ont ensuite subi l'exploitation, tout en conservant des témoins non perturbés dans chaque zone. L'exploitation a eu lieu entre les campagnes d'inventaire 1 et 2 (excepté pour les placettes 25 et 27 de la zone Afrormosia, Tableau 2), à des intensités (nombre d'arbres exploités par hectare) allant de 0 à 9 arbres/ha en fonction des placettes (0 à 9,1 $m^2 \cdot ha^{-1}$). Au sein d'un même bloc, on peut donc avoir différentes intensités d'exploitation (Tableau 2).

Analyses

Analyse de la composition floristique

Une Analyse Non Symétrique des Correspondances (ANSC) a été réalisée afin de caractériser les différentes zones en terme de composition floristique avant exploitation. Contrairement à l'AFC, l'ANSC fournit une ordination des échantillons basée essentiellement sur les espèces abondantes, les espèces rares intervenant peu (Jacquet et Prodon 2014). Ici, nous nous intéressons plus particulièrement aux espèces les plus représentées, celles qui caractérisent et dominent les parcelles. C'est pourquoi l'ANSC est plus adaptée.

Pour étudier la composition floristique du peuplement dans chaque zone seules les placettes totalement inventoriées ont été utilisées. En revanche, toutes les placettes ont été utilisées pour étudier la composition du groupe des espèces commerciales (Figure 2).

Analyse de la croissance

Dans cette étude, la croissance est étudiée par l'intermédiaire de l'accroissement en diamètre des individus. A partir des différentes mesures de diamètre réalisées au cours des quatre

campagnes d'inventaire, l'accroissement diamétrique annuel moyen (cm.an^{-1}) de chaque individu, entre deux inventaires, a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta D = (D_{n+x} - D_n) / (t_{n+x} - t_n)$$

Avec D_{n+x} : diamètre de l'arbre à la campagne d'inventaire $n+x$, D_n : diamètre de l'arbre à la campagne d'inventaire n , t_{n+x} : date de la campagne d'inventaire $n+x$ et t_n : date de la campagne d'inventaire n (Favrichon et al. 1998).

L'accroissement annuel moyen a été calculé pour quatre périodes de temps différentes : les périodes de temps comprises entre les campagnes d'inventaire 1 et 2 (« Campagne 1-2 »), les campagnes 2 et 3 (« Campagne 2-3 »), les campagnes 3 et 4 (Campagne 3-4) et les campagnes 1 et 4 (Campagne 1-4 ») (Tableau 2).

Afin de ne travailler que sur des données exemptes de toutes erreurs ou incohérences, les accroissements ont été calculés uniquement sur les arbres satisfaisant certaines exigences. Au total, 2% des arbres ont été éliminés. Dans un premier temps, les arbres doivent être présents et vivants pendant toute la période sur laquelle on calcule l'accroissement, c'est-à-dire de la campagne n à la campagne $n+x$. Tous les arbres recrutés ou mort au cours de cette période ont été éliminés. Dans un second temps, les arbres présentant des défauts de conformation ainsi que ceux dont le niveau de mesure a été modifié, pour cause de blessures ou d'apparition de contreforts, ont été éliminés car ils entraînent des biais sur l'estimation de la croissance (Forni et al. 2015). Dans un troisième temps, les arbres dont le diamètre a été « estimé » n'ont pas été retenus car ce sont toujours de très gros arbres dont les mesures ne sont pas fiables. De la même manière, les arbres ayant pour observation « problème de mesure » n'ont pas été conservés car la différence entre deux mesures de diamètre, d'une campagne à une autre, est anormale et ne constitue pas une donnée fiable. Les arbres présentant l'observation « ficus » ont également été éliminés du jeu de données car si le ficus est soudé au tronc cela pourrait entraîner une surestimation du diamètre de l'arbre et de son accroissement, le ficus n'ayant pas la même dynamique de croissance que celui-ci. Pour exclure les erreurs de mesure les plus importantes, qui n'auraient pas été éliminées suite à l'apurement décrit précédemment, seuls les accroissements compris entre $-0,4 \text{ cm.an}^{-1}$ et 6 cm.an^{-1} ont été pris en compte. Il est important de tenir compte des accroissements négatifs, qui sont biologiquement possibles : la partie vivante du tronc peut se contracter, lors de la saison sèche, sous l'effet d'une perte en eau (Favrichon et al. 1998). La borne maximale a été déterminée à partir de l'espèce *Musanga cecropioides* (Parasolier) qui présente les valeurs d'accroissement les plus élevées (Ouedraogo 2008).

L'accroissement annuel moyen a été calculé sur les arbres du peuplement d'une part et du groupe des espèces commerciales principales d'autre part. Pour étudier l'accroissement annuel des arbres du peuplement, en fonction de la zone ou du traitement sylvicole, seuls les accroissements des arbres issus des placettes totalement inventoriées ont été utilisés. En revanche, l'analyse de la croissance des espèces commerciales principales a reposé sur les données d'accroissement issues des deux types de placettes trouvées dans un bloc (Figure 2).

Tests statistiques et modèles

Tests statistiques

De manière à tester si une variation de croissance est due à une variable qualitative (zone, traitement sylvicole), ou au hasard, une ANOVA à un facteur a été employée. Pour une analyse

de covariance de variables quantitatives (intensité d'exploitation) et qualitatives une ANCOVA a été réalisée. Le seuil de significativité des p-values des tests statistiques a été fixé à 5 %.

Utilisation des modèles linéaires mixtes

Dans toute expérience, les données présentent une certaine variabilité. Tout l'intérêt d'une étude statistique est d'en déterminer la nature, l'importance, les facteurs explicatifs, etc. Un moyen élaboré d'étudier cette variabilité, en précisant les diverses sources de variation, consiste à introduire des effets aléatoires dans la modélisation (Martinez 2006). Les effets aléatoires ont une grande quantité de niveaux. On ne cherche pas à connaître l'effet de chacun des niveaux observés d'un effet aléatoire mais plutôt à estimer la variabilité due à cet effet (Lavergne et Trottier 2000). La variance totale est ainsi divisée en deux parties que sont la variation due aux effets aléatoires et celle que l'on affecte à l'erreur. Les modèles linéaires mixtes sont donc une extension des modèles linéaires classiques puisque des effets aléatoires viennent s'ajouter aux effets fixes de ces derniers (Martinez 2006). Ces modèles se présentent alors de la manière suivante :

$$Y \approx \beta X + \xi U + \varepsilon$$

Avec :

- Y : vecteur aléatoire à expliquer de taille n,
- β : vecteur de paramètres inconnus des effets fixes, de taille p,
- X : sa matrice d'incidence supposée fixe et connue, de dimension $n \times p$
- ξ : vecteur d'effets aléatoires de taille q. On suppose en général une distribution normale centrée des effets aléatoires,
- U : sa matrice d'incidence connue et formée des matrices d'incidence de chaque effet aléatoire, de dimension $n \times q$,
- ε : vecteur aléatoire d'erreurs, de taille n, à distribution normale centrée.

La variable à expliquer dans cette étude est l'accroissement diamétrique annuel moyen des arbres (cm.an^{-1}) lors de trois périodes d'accroissement successives (Campagne 1-2, Campagne 2-3, Campagne 3-4). Cette variable a été transformée en $\log(x+1)$, avec x l'accroissement, pour obtenir une variable expliquée dont la distribution est plus proche de la normale. S'agissant de mesures répétées sur les mêmes arbres, des modèles linéaires mixtes ont été employés.

Pour comparer les modèles statistiques, le critère d'information d'Akaike (AIC) a été choisi car il dépend de la vraisemblance du modèle, contrairement au coefficient de détermination multiple R^2 . Un modèle sera jugé meilleur qu'un autre lorsque son AIC sera le plus faible (Bertrand 2010).

Etude de l'effet de variables dendrométriques et environnementales sur la croissance des arbres appartenant aux peuplements complets

L'objectif de cette analyse est de déterminer les variables expliquant la variabilité observée dans l'accroissement diamétrique annuel moyen des arbres des peuplements complets. Les modèles testés reposent sur les données d'accroissement issues des placettes totalement inventoriées dans les zones témoins et exploitées (Tableau 2), excepté les données provenant des placettes totalement inventoriées de la zone « Forêt claire ». En effet, faute d'effectifs suffisants par rapport aux trois autres zones, aucun test statistique incluant cette zone ne s'est révélé significatif et les modèles l'incluant avaient un AIC supérieur aux modèles ne l'incluant pas. Au total 5569

arbres, de 205 espèces différentes, ont été observés. Parmi les variables explicatives de ces modèles, différents effets fixes ont été testés :

(1) Le diamètre (LogDiam) : variable quantitative qui correspond au logarithme du diamètre de l'arbre au début d'une période d'accroissement donnée.

(2) La zone (Zone) : variable qualitative qui traduit les caractéristiques environnementales (sol, densité du peuplement, composition floristique, etc.) de chaque zone d'inventaire.

(3) Les variables climatiques (Annexe 2) : plusieurs variables quantitatives ont été calculées et testées. Des données journalières de pluviométrie (mm.jour^{-1}) et des données de températures journalières moyennes ($^{\circ}\text{C}$) ont été importées depuis Climate engine ([https://climate-engine.appspot.com/ClimateEngine](https://climate.engine.appspot.com/ClimateEngine)). Cet outil utilise Google Earth pour le traitement à la demande de données climatiques satellitaires via un navigateur Web (Huntington et al., s. d.). Les données de pluviométrie sont des données CHIRPS c'est-à-dire des statistiques longues d'estimation de pluie basées sur les données de l'instrument VIRS (Visible and InfraRed Scanner) embarqué à bord du satellite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) et produites au JRC (Joint Research Center of the European Commission). Les données de température sont des données CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), développées par les NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Elles proviennent du NOMADS (National Operational Model Archive and Distribution System) de la NOAA, qui est mis à jour dans les NCEI (National Centers for Environmental Information) de la NOAA (NOAA, s. d.). Des données mensuelles moyennes d'irradiation directe normalisée (DNI, W.m^{-2}), produites par le CM SAF (https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01), ont également été acquises afin de quantifier la lumière reçue à la surface (Philippon et al. 2019). Le CM SAF (Satellite Application Facility for Climate Monitoring) développe, produit, archive et diffuse des produits basés sur des données satellitaires, couvrant principalement les paramètres liés au cycle de l'énergie et de l'eau. Les données de DNI sont des données SARAH-2 obtenues à partir des canaux visibles du MVIRI (Meteosat Visible and InfraRed Imager) et des instruments SEVIRI à bord des satellites géostationnaires Météosat (CM SAF, s. d.).

Toutes ces données recueillies englobent spatialement les quatre zones de dispositifs permanents et couvrent une période allant de 2002 à 2017. Les variables climatiques ont été calculées par période d'accroissement entre deux campagnes d'inventaire, chaque période variant selon les zones (Tableau 2) : elles ne traduisent donc pas une variabilité spatiale du climat mais une variabilité temporelle entre les zones. Dans un premier temps, deux variables pluviométriques ont été calculées :

- a) Précipitations annuelles moyennes (Pluie_an) en mm.an^{-1} : somme des précipitations journalières lors d'une période d'accroissement, divisée par le nombre de jours écoulés durant cette même période, le tout multiplié par 365 pour obtenir des données annuelles.
- b) Nombre maximal de jours secs consécutifs (Sec) : phase de sécheresse la plus longue, où les précipitations sont nulles, lors d'une période d'accroissement donnée.

Dans un second temps, quatre variables de température ont été calculées :

- c) Température journalière moyenne par période d'accroissement (Temp_moy) en $^{\circ}\text{C}$: somme des températures journalières moyennes lors d'une période d'accroissement, divisé par le nombre de jours écoulés durant cette même période.

- d) Ecart maximum annuel moyen de température par période d'accroissement (Ecart_temp_an) en °C : soustraction entre la température journalière moyenne maximale et la température journalière moyenne minimale pour chaque année d'une période d'accroissement. Puis la somme de ces écarts de température est divisée par le nombre d'années lors de cette même période.
- e) Ecart maximum moyen de température lors des saisons sèches principales d'une période d'accroissement (Ecart_temp_sec) en °C : soustraction entre la température journalière moyenne maximale et la température journalière moyenne minimale pour chaque saison sèche principale (mi-décembre à mi-mars) d'une période d'accroissement (Figure 3). Puis la somme de ces écarts de température est divisée par le nombre de saisons sèches principales lors de cette même période.
- f) Ecart maximum moyen de température lors des saisons pluvieuses principales (mi-août à mi-décembre) d'une période d'accroissement (Ecart_temp_pluie) en °C : le calcul est identique à celui réalisé précédemment mais cette fois-ci appliqué aux saisons pluvieuses (Figure 3).

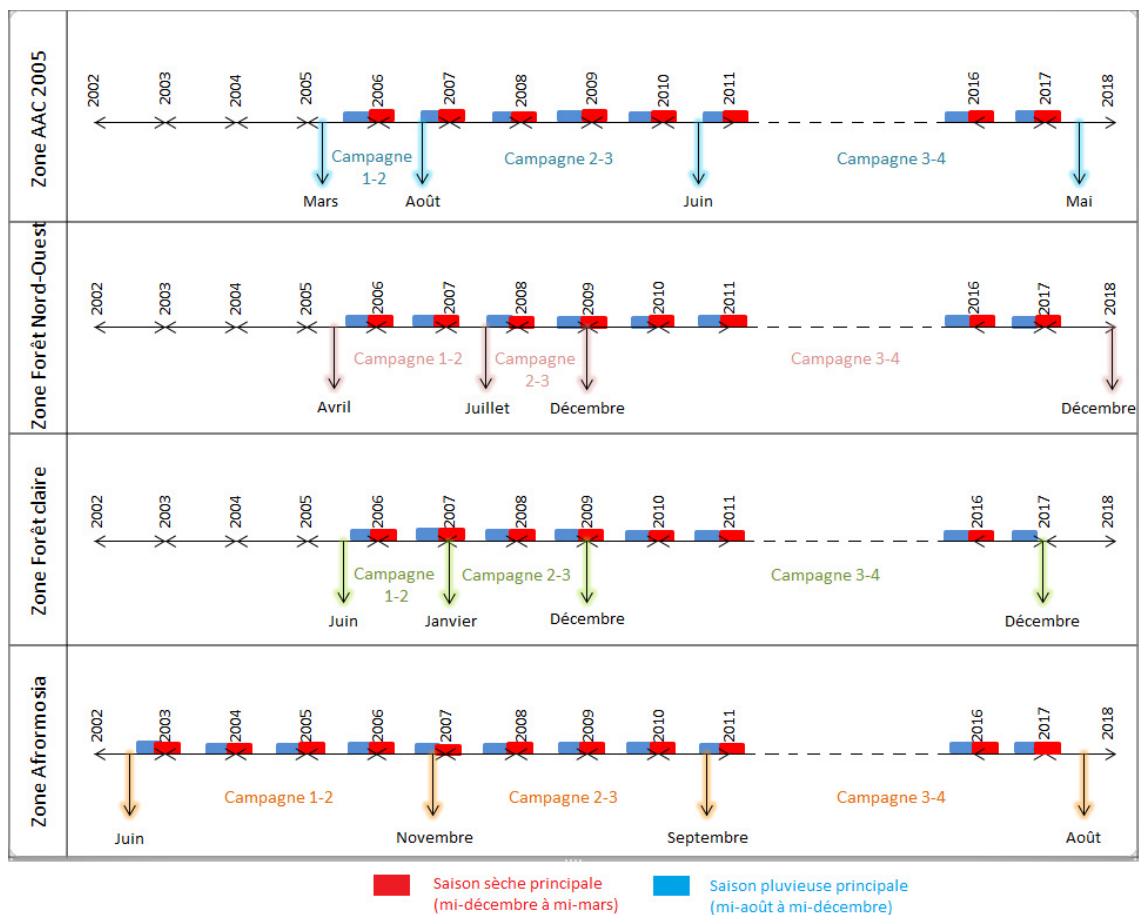


Figure 3 : Schéma calendaire positionnant les dates des campagnes d'inventaire et les saisons sèches et pluvieuses principales de chacune des périodes d'accroissement des différentes zones. La campagne 3-4 n'a pas été représentée en intégralité.

Dans un troisième temps, les données de DNI et de pluviométrie ont permis de calculer :

- g) L'écart entre irradiation normalisée directe mensuelle moyenne ($W.m^{-2}$) et les précipitations journalières moyennes par mois ($mm.jour^{-1}$) (Ecart_DNI_pluie) : tout d'abord les précipitations journalières moyennes par mois ont été calculées. Il s'agit de la somme des précipitations journalières pour chaque mois, divisé par le nombre de jours que compte ce mois. Ensuite une différence a été faite entre l'irradiation normalisée

directe mensuelle moyenne et les précipitations journalières moyennes par mois (Annexe 3). Finalement cette différence a été moyennée par période d'accroissement.

(4) L'intensité d'exploitation (Intens) : variable quantitative qui correspond au nombre d'arbres abattus par hectare (Tableau 2). La valeur 0 a été attribuée aux placettes témoins puisque l'intensité d'exploitation y est nulle. Pour les placettes 13, 47 et 55 dans lesquelles aucun arbre n'a été abattu mais qui ne sont pas des témoins deux valeurs d'intensité ont été attribuées : 0,5 pour les placettes sans piste de débardage (placettes 13 et 55) et 0,8 pour la placette 47 qui est en partie traversée par une piste. La valeur 0 ne pouvait pas être attribuée aux placettes 13 et 55 car même si aucun arbre n'y a été abattu nous pouvons supposer que l'exploitation dans les placettes alentour a eu un impact sur celles-ci, les rendant différentes des témoins. La valeur 0,5 a donc été choisie puisqu'il s'agit de la valeur moyenne des placettes témoins et des placettes ayant subi l'intensité d'exploitation la plus faible (1 arbre/ha). En ce qui concerne la placette 47 la valeur d'intensité d'exploitation (0,8) a été calculée en pondérant la longueur de piste traversant celle-ci par le nombre d'arbres abattus pour la longueur totale des pistes du bloc.

(5) Le temps écoulé depuis l'exploitation, en années (Tps_expl) : variable quantitative calculée en fonction de l'année d'exploitation et de l'année moyenne d'une période d'accroissement d'une zone (Tableau 2). Pour les zones témoin, la dernière perturbation liée à l'exploitation est beaucoup plus ancienne que celle des zones exploitées. Afin de respecter ce gradient temporel il a été défini que le temps écoulé depuis l'exploitation des placettes témoin est de 20 ans à la campagne d'inventaire 1.

Deux variables ont été utilisées dans la partie aléatoire des modèles :

(1) L'individu (Ind) : variable qualitative correspondant à l'effet individuel sur l'accroissement de chacun des arbres du peuplement considéré.

(2) L'espèce (Sp) : variable qualitative prenant en compte les différences de comportement en croissance des individus d'espèces différentes. Cet effet aléatoire intègre la variance entre les espèces dans la réponse à chaque valeur d'effet fixe.

Etude de l'effet de variables dendrométriques et environnementales sur la croissance des arbres appartenant à la même espèce commerciale

A la différence des modèles précédents, ceux-ci ne concernent qu'une espèce commerciale à la fois. Les modèles testés reposent sur des données d'accroissement issues de toutes les placettes inventoriées (Tableau 2, Figure 2), excepté les données provenant des placettes de la zone « Forêt claire » pour les mêmes raisons qu'explicité précédemment.

Les effets fixes testés dans ces modèles sont identiques à ceux décrits auparavant. En revanche la variable traduisant l'intensité d'exploitation (Intens) n'a pas pu être testée ici car cette dernière n'est connue que pour les placettes qui ont été totalement inventoriées (Tableau 2) or les espèces commerciales ont été suivies dans toutes les placettes (Figure 2). Pour remplacer cette variable, un effet fixe traitement (Trait) a été utilisé. Ce dernier est qualitatif et permet de distinguer les individus témoins de ceux qui se trouvent en zone exploitée.

Le logiciel utilisé pour réaliser les analyses graphiques, les modèles et les tests statistiques est R avec l'interface Rstudio. Les packages employés sont *ade4* pour effectuer des ANSC, *lmerTest* pour les modèles linéaires mixtes et *ggplot2* pour les représentations graphiques.

RÉSULTATS

Etude de la structure diamétrique des peuplements

Les distributions diamétriques ne sont pas les mêmes entre les zones (Figure 4). Les zones Forêt Nord-Ouest et Afrormosia sont caractérisées par des structures diamétriques classiques de forêts tropicales bien équilibrées, en J inversé. La zone Afrormosia possède tout de même un nombre un peu plus élevé de gros arbres. La zone AAC 2005 est caractérisée par un déficit d'arbres de petit diamètre, comparativement à la zone Afrormosia. Dans la zone Forêt claire, très peu dense, les effectifs sont répartis de manière plus homogène entre les classes de diamètre.

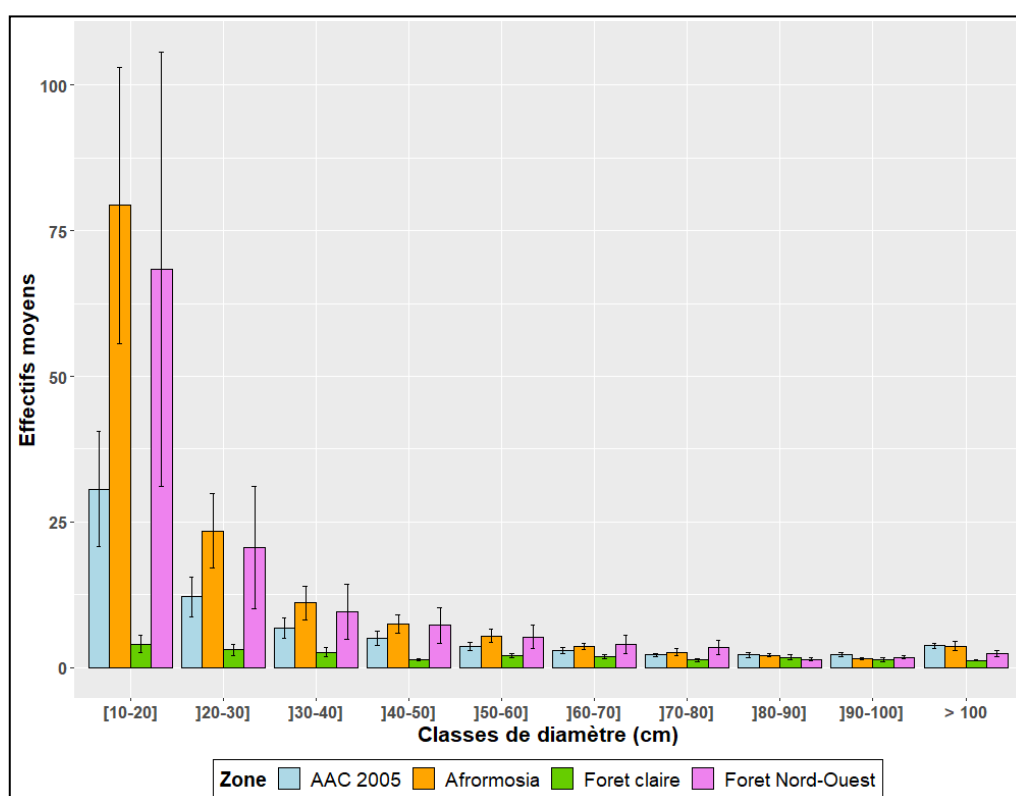


Figure 4 : Représentation graphique de la structure diamétrique des peuplements de chaque zone. Les effectifs moyens ont été calculés à partir des effectifs des placettes de chaque zone lors de la campagne 1 (témoin).

Etude de la composition floristique

Composition floristique du peuplement de chaque zone

Cette première ANSC (Figure 5), nous permet d'étudier et de comparer la composition floristique des quatre zones de cette étude. Les deux premières composantes de l'ANSC expliquent 61 % de la variabilité totale. Le premier axe (37,22 % de la variabilité) oppose les placettes dans lesquelles l'espèce *Rinorea oblongifolia* (MOS) est abondante aux placettes où elle ne l'est pas tandis que les espèces du genre *Manilkara* (MUM) le sont. Le deuxième axe (23,65 % de la variabilité) oppose les placettes fortement représentées par l'espèce *Dichostemma glaucescens* (MUN) de celles qui ne le sont pas. La zone Afrormosia semble être caractérisée par l'espèce *Rinorea oblongifolia*. En revanche, les placettes de la zone AAC 2005 sont représentées

par différentes espèces. Par exemple, *Dichostemma glaucescens* est une espèce abondante dans la placette 47 alors que les espèces du genre *Manilkara* le sont dans les placettes 45 et 63. La zone Forêt Nord-Ouest, elle, est caractérisée par l'espèce *Plagiostyles africana* (IBE).

La zone Afromosia a une composition floristique hétérogène et très différente des autres zones (axe 1). Les zones Forêt Nord-Ouest et Forêt claire sont les deux zones les moins hétérogènes et qui se ressemblent le plus. Enfin, la zone AAC 2005 présente une très grande variabilité.

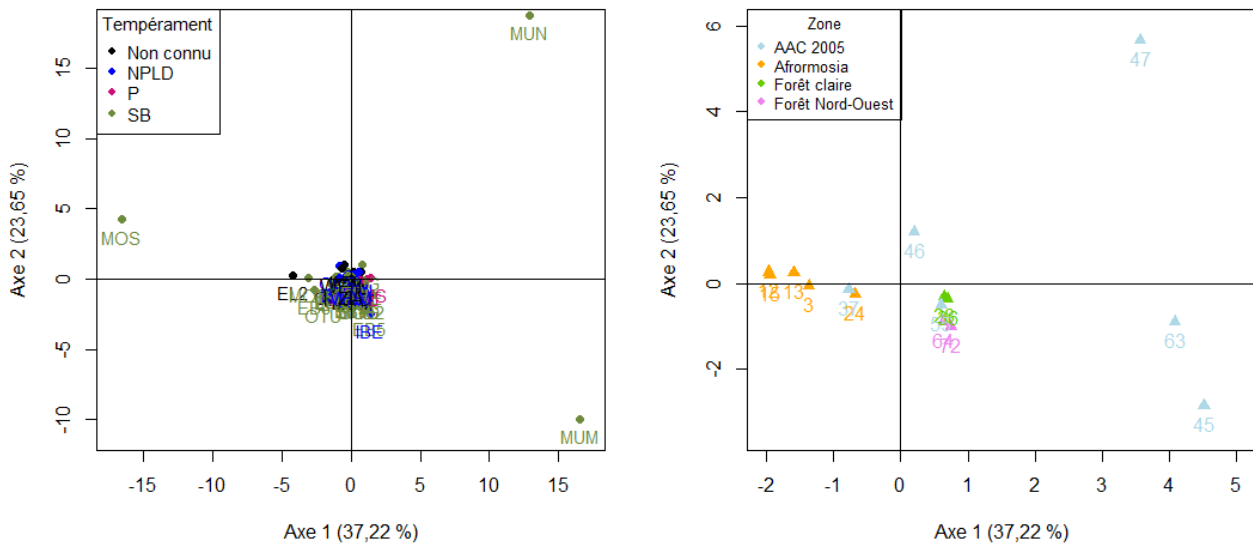


Figure 5 : Représentation graphique de l'ANSC effectuée sur les espèces présentes dans les placettes totalement inventoriées, lors de la campagne d'inventaire 1 (avant exploitation). Les placettes 25 et 27 de la zone Afromosia n'ont pas été prises en compte car elles ont été exploitées avant la campagne 1. A gauche, graphique représentant les colonnes, soit les espèces, et à droite graphique représentant les lignes, soit les placettes, sur le plan factoriel 1/2.

En termes de tempéraments, la zone Forêt claire est la plus riche en espèces pionnières et héliophiles. Les zones AAC 2005 et Afromosia sont plus riches en espèces pionnières que la zone Forêt Nord-Ouest, cette dernière étant la plus dominée par des espèces tolérantes à l'ombrage. Néanmoins, la part de tempéraments non connus reste relativement élevée dans chacune des zones (Annexe 4).

Composition en espèces commerciales principales de chaque zone

Une deuxième ANSC (Figure 6) a été réalisée avec pour objectif d'étudier la composition en espèces commerciales (Annexe 1) de chacune des zones d'étude. Les deux premières composantes de l'ANSC expliquent 49 % de la variabilité totale. Le premier axe (36,01 % de la variabilité) distingue les placettes où l'on trouve principalement *Millettia laurentii* (WEN) de celles composées d'*Entandrophragma cylindricum* (SAP). Le deuxième axe (13,35 % de la variabilité) oppose des placettes riches en *Lophira alata* (AZO) de celles qui sont riches en *Pericopsis elata* (AFR). On constate une grande hétérogénéité inter et intra zones malgré une abondance plus importante de *Lophira alata* et *Millettia laurentii* dans la zone AAC 2005 et de *Millettia laurentii* et *Pericopsis elata* dans la zone Afromosia.

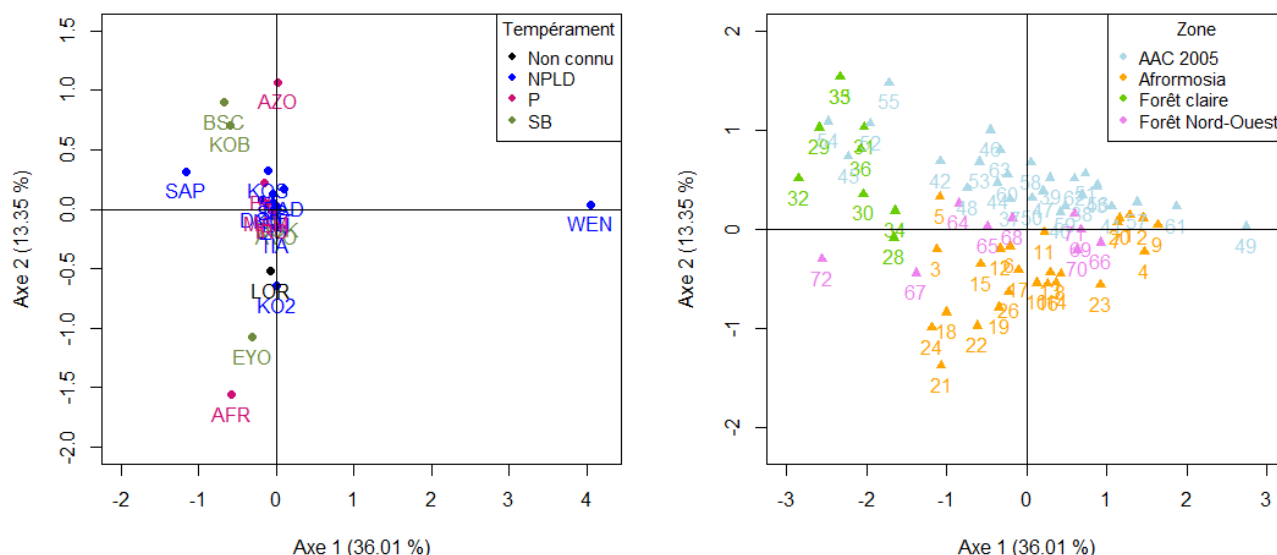


Figure 6 : Représentation graphique de l'ANSC effectuée sur les espèces commerciales principales présentes dans toutes les placettes inventoriées, lors de la campagne d'inventaire 1 (avant exploitation). Les placettes 25 et 27 de la zone Afrormosia n'ont pas été prises en compte car elles ont été exploitées avant la campagne 1. A gauche, graphique représentant les colonnes, soit les espèces, et à droite graphique représentant les lignes, soit les placettes, sur le plan factoriel 1/2.

En ce qui concerne le tempérament des espèces commerciales, on constate que la zone Forêt Nord-Ouest est la moins riche en espèces commerciales pionnières mais la plus riche en espèces commerciales héliophiles. La zone Forêt claire est, à l'inverse, la zone la plus riche en espèces commerciales tolérantes à l'ombrage. En ce qui concerne les zones AAC 2005 et Afrormosia, leur composition en espèces héliophiles et tolérantes à l'ombrage est similaire (Annexe 5).

Etude de la croissance

Croissance des arbres appartenant aux peuplements complets

Comparaison de la croissance entre les zones d'inventaire

Les arbres de la zone Forêt Nord-Ouest, en condition témoin, ont un accroissement significativement moins important que celui des arbres des zones AAC 2005 et Forêt claire, quelle que soit la période considérée (Figure 7). En revanche, les arbres des zones Forêt Nord-Ouest et Afrormosia ont un accroissement annuel moyen semblable, sauf lors de la campagne 2-3. Dans la zone Forêt claire, l'accroissement annuel moyen des arbres n'est pas significativement différent de celui des arbres de la zone AAC 2005. Pour finir, l'accroissement annuel moyen des arbres de la zone AAC 2005 est significativement supérieur à celui des arbres de la zone Afrormosia, sauf lors de la campagne 2-3 pour laquelle aucune différence significative n'est observée.

En traitement exploité, l'accroissement annuel moyen des arbres de la zone AAC 2005 est significativement supérieur à celui de la zone Afrormosia, sauf lors de la campagne 2-3 pour laquelle il n'y a pas de différence significative. On constate que l'exploitation induit des différences d'accroissement annuel plus importantes entre les arbres de ces deux zones qu'en traitement témoin. En revanche, pendant la campagne 2-3 et indépendamment du traitement, l'accroissement n'est pas significativement différent entre les arbres des zones AAC 2005 et Afrormosia car la croissance dans cette dernière a fortement augmenté (Figure 7).

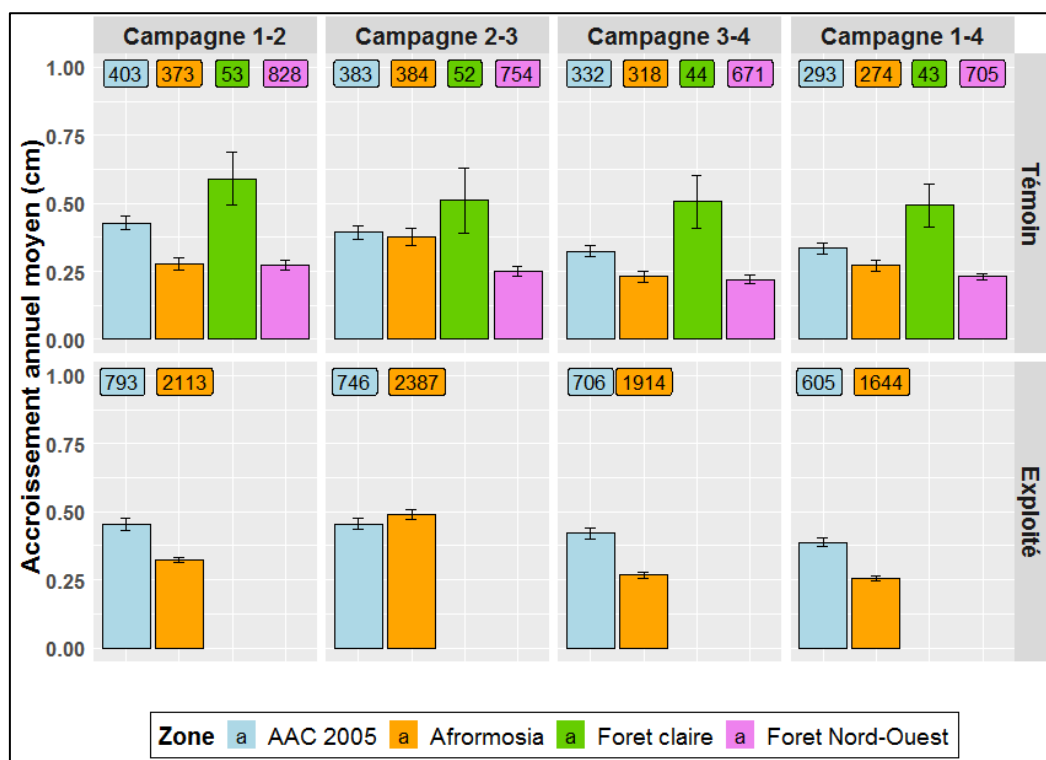


Figure 7 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) des arbres du peuplement de chaque zone en fonction de la période d'accroissement et du traitement. Les effectifs qui ont servi à chaque calcul d'accroissement annuel moyen sont indiqués.

Lorsque l'on s'intéresse plus particulièrement aux différentes périodes de croissance, on observe dans les zones témoins et exploitées que l'accroissement des arbres est significativement plus important lors des campagnes 1-2 et 2-3 que lors de la campagne 3-4. Ceci est particulièrement visible lorsque l'on confond l'accroissement des différentes zones (Annexe 6).

Comparaison de la croissance entre les traitements

Que ce soit dans les blocs témoin ou exploités on observe une décroissance de l'accroissement annuel moyen des arbres lorsque leur diamètre augmente (Annexe 7). L'accroissement semble plus important pour les arbres de petit diamètre. Toutefois, cette décroissance est plus marquée dans les blocs exploités : l'exploitation forestière augmente davantage l'accroissement des arbres de petit diamètre.

Pour étudier l'effet de l'exploitation forestière plus en détail les calculs et les analyses ont été faits sur les deux zones présentant à la fois des blocs témoins et exploités, c'est-à-dire les zones AAC 2005 et Afrormosia (Figures 8 et 9).

Dans la zone AAC 2005, l'accroissement annuel moyen est significativement supérieur en traitement exploité par rapport au témoin, sauf lors de la campagne 1-2 où il n'y a pas de différence significative entre les deux traitements (Figure 8). Dans la zone Afrormosia, l'accroissement annuel moyen en traitement exploité n'est pas significativement supérieur au témoin, quelle que soit la période d'accroissement considérée (Figure 8).



Figure 8 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) du peuplement des zones AAC 2005 et Afrormosia en fonction de la période d'accroissement et du traitement. Les effectifs qui ont servi à l'élaboration de chacun des boxplots sont indiqués. Chaque * symbolise l'accroissement annuel moyen.

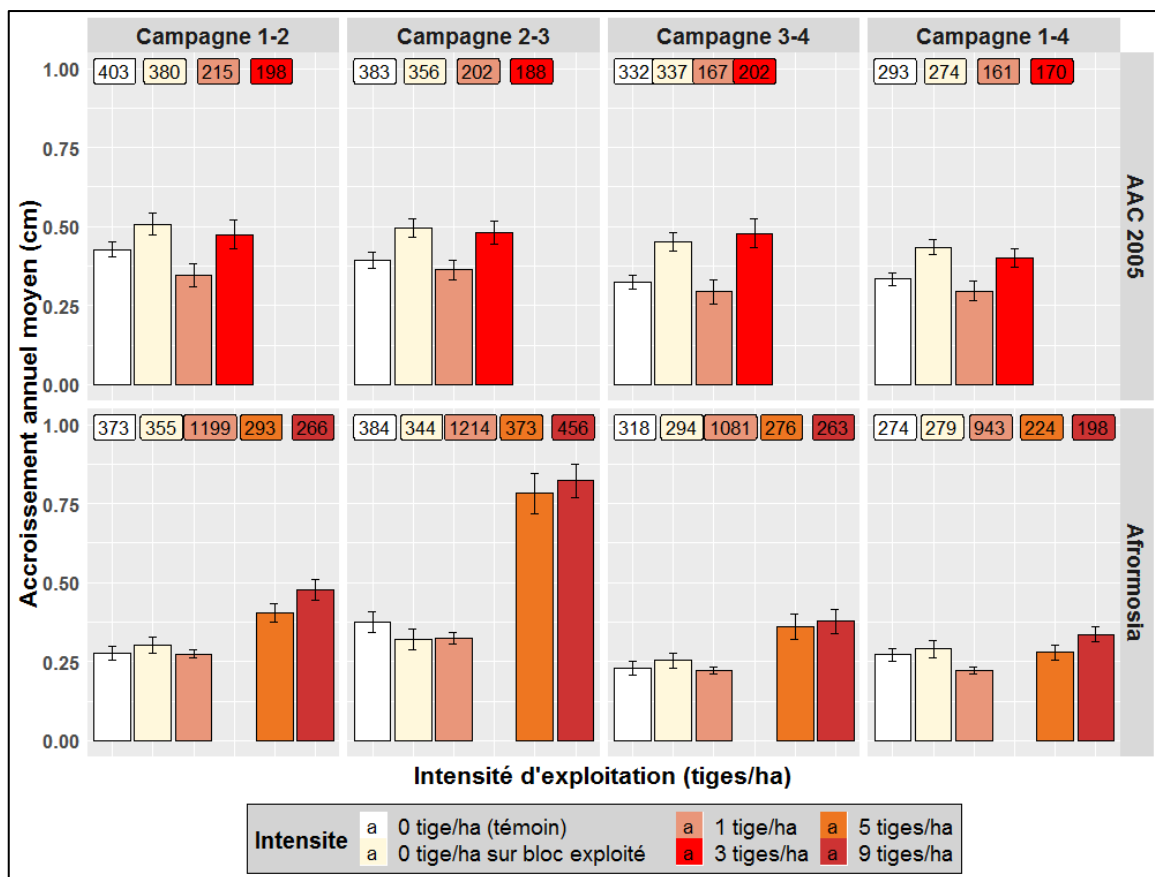


Figure 9 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) du peuplement des zones AAC 2005 et Afrormosia en fonction de l'intensité d'exploitation (tiges.ha⁻¹) et de la période d'accroissement. Les effectifs qui ont servi à chaque calcul d'accroissement annuel moyen sont indiqués.

Les accroissements annuels moyens ont été comparés en fonction de l'intensité d'exploitation dans les zones AAC 2005 et Afrormosia (Figure 9). En ce qui concerne la zone AAC 2005, nous pouvons constater deux choses : 1) l'accroissement en condition de faible intensité d'exploitation, c'est-à-dire 1 tige/ha, ne diffère pas significativement de l'accroissement en condition témoin ; 2) les placettes en condition « 0 tige/ha sur bloc exploité » ont un accroissement élevé, significativement semblable à l'accroissement des placettes ayant subi une intensité d'exploitation de 3 tiges/ha. Néanmoins, lors de la campagne 1-2, l'accroissement n'est pas significativement différent entre le témoin et les intensités de « 0 tige/ha sur bloc exploité » et 3 tiges/ha. Dans la zone Afrormosia nous pouvons également faire deux constats : 1) l'accroissement en condition « 0 tige/ha sur bloc exploité » ainsi que l'accroissement en condition de faible intensité d'exploitation (1 tige/ha) ne diffèrent pas significativement de l'accroissement en condition témoin ; 2) l'accroissement en condition de forte intensité d'exploitation, c'est-à-dire 5 ou 9 tiges/ha, est significativement plus élevé que le témoin.

Etude de l'effet de variables dendrométriques et environnementales sur la croissance des arbres appartenant aux peuplements complets

La qualité prédictive de l'accroissement diamétrique annuel moyen diffère entre tous les modèles testés. Tous ces modèles reposent sur le même modèle de base (Tableau 3, *M1*). A ce modèle commun ont été ajoutées différentes variables climatiques pour tester, leur part d'explication dans la variabilité de l'accroissement des arbres (Tableau 3, Annexe 8). Seul le meilleur modèle (AIC le plus faible), incluant l'écart maximum moyen de température lors des saisons sèches principales d'une période d'accroissement (*Ecart_temp_sec*), est présenté dans cette partie (Tableau 3, *M2*). Néanmoins d'autres variables climatiques montrent également un effet significatif sur l'accroissement annuel moyen (Annexe 7). Une interaction entre variable climatique et temps écoulé depuis l'exploitation (*Tps_expl*) (Tableau 3, *M3* et Annexe 8) a été testée pour les variables climatiques ayant un effet significatif.

Dans tous les modèles *LogDiam* a un effet négatif significatif ($P < 0,05$) sur l'accroissement diamétrique annuel moyen : les arbres de gros diamètre ont un accroissement moins important que les arbres de petit diamètre. On observe également un effet significatif des zones : les arbres des zones Afrormosia et Forêt Nord-Ouest présentent un accroissement significativement inférieur ($P < 0,001$) à celui des arbres de la zone AAC 2005. De plus, cet accroissement dans la zone Forêt Nord-Ouest est inférieur à celui de la zone Afrormosia. L'interaction entre *LogDiam* et la zone Afrormosia a un effet positif significatif sur la croissance : l'accroissement en diamètre dans la zone Afrormosia augmente davantage que dans la zone AAC 2005, ce qui n'est pas le cas dans la zone Forêt Nord-Ouest pour laquelle l'interaction n'est pas significative.

L'intensité d'exploitation (*Intens*) ne présente aucun effet significatif. Cependant, le temps écoulé depuis l'exploitation (*Tps_expl*) a un effet négatif significatif sur l'accroissement des arbres appartenant aux peuplements complets dans les modèles *M1* ($P < 0,001$) et *M2* ($P < 0,05$). Plus on s'éloigne dans le temps du moment où a eu lieu l'exploitation forestière, plus l'accroissement annuel moyen diminue. L'interaction entre les deux variables précédentes (*Intens* : *Tps_expl*) présente un effet significativement négatif ($P < 0,001$) : plus l'intensité d'exploitation est élevée, plus court est son effet dans le temps. Enfin, l'interaction entre *LogDiam* et l'intensité d'exploitation (*LogDiam* : *Intens*) a un effet positif significatif ($P < 0,001$ *M1* ; $P < 0,05$ *M2* et *M3*), traduisant le fait que plus le diamètre de l'arbre est élevé et plus l'intensité d'exploitation l'a également été, plus son accroissement diamétrique est important.

La variable climatique Ecart_temp_sec (Tableau 3, M2 et M3) a un effet significativement positif ($P < 0,001$ M2 ; $P < 0,01$ M3) sur l'accroissement annuel moyen. Plus l'écart maximal moyen de température en saison sèche est important, plus l'accroissement en diamètre l'est également. L'interaction entre cette variable climatique et le temps écoulé depuis l'exploitation (Tps_expl : Ecart_temp_sec) n'a pas d'effet significatif. Toutefois, dans certains modèles comprenant une autre variable climatique (Annexe 8), on observe une interaction positive : plus le temps après exploitation est long, plus l'effet (positif ou négatif) de la variable climatique sur l'accroissement réapparaît et s'intensifie.

Les effets de l'individu (Ind) et de l'espèce (Sp) sur la variabilité de l'accroissement diamétrique annuel moyen des arbres sont significatifs ($P < 0,001$). L'espèce a un pouvoir explicatif de la variance d'accroissement plus important que l'individu : l'accroissement entre les espèces varie davantage que l'accroissement entre chaque arbre. La réponse de l'accroissement à l'espèce est également dépendante du diamètre.

Tableau 3 : Synthèse des paramètres des modèles reliant le logarithme de l'accroissement diamétrique annuel moyen de 5569 arbres issus de peuplements complets à plusieurs variables explicatives : le diamètre (LogDiam), la zone, l'intensité d'exploitation (Intens), le temps écoulé depuis l'exploitation (Tps_expl) et la variable climatique Ecart_temp_sec. Les variances associées au facteur aléatoire Ind, au facteur aléatoire Sp et à l'erreur résiduelle sont également présentées.-- " : absence de la variable dans le modèle concerné. Significativité statistique aux risques : 0,05 : "*", 0,01 : "**", 0,001 : "***", non significatif : "ns".

| <i>Variables explicatives</i> | | <i>M1</i> | <i>M2</i> | <i>M3</i> |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | AIC = 341 | AIC = 306 | AIC = 321 |
| <i>Effets fixes</i> | Intercept | 0.5052 *** | 0.2151 *** | 0.2609 ** |
| | LogDiam | -0.0305 * | -0.0293 * | -0.0293 * |
| | Zone Afrormosia | -0.2196 *** | -0.2259 *** | -0.2250 *** |
| | Zone Forêt Nord-Ouest | -0.2315 *** | -0.2666 *** | -0.2669 *** |
| | Intens | ns | ns | ns |
| | Tps_expl | -0.0025 *** | -0.0009 * | ns |
| | Ecart_temp_sec | -- | 0.0340 *** | 0.0283 ** |
| | LogDiam : Zone Afrormosia | 0.0338 * | 0.0354 *** | 0.0352 ** |
| | LogDiam : Zone Forêt Nord-Ouest | ns | ns | ns |
| | LogDiam : Intens | 0.0063 ** | 0.0059 * | 0.0059 * |
| | Intens : Tps_expl | -0.0025 *** | -0.0020 *** | -0.0021 *** |
| | Tps_expl : Ecart_temp_sec | -- | -- | ns |
| <i>Effets aléatoires</i> | Ind (Intercept) | 0.0254 *** | 0.0254 *** | 0.0254 *** |
| | Sp (Intercept) | 0.0720 *** | 0.0723 *** | 0.0722 *** |
| | LogDiam | 0.0066 *** | 0.0066 *** | 0.0066 *** |
| | Erreur résiduelle | 0.0392 | 0.0391 | 0.0391 |

Croissance des arbres appartenant au groupe des espèces commerciales principales

Comparaison de la croissance entre les zones d'inventaire

Sur les blocs témoins la croissance des espèces commerciales est nettement plus importante dans la zone AAC 2005 que dans les zones Forêt Nord-Ouest et Afrormosia où elle ne diffère pas significativement, quelle que soit la période d'accroissement considérée. Dans la zone Forêt claire, l'accroissement des espèces commerciales n'est pas significativement différente de l'accroissement observé dans les autres zones, excepté lors de la campagne 2-3 : la différence est alors significativement supérieure avec la zone AAC 2005. Dans les blocs exploités la croissance est significativement plus importante dans la zone AAC 2005 que dans la zone Afrormosia (Figure 10).

Globalement, les différences d'accroissement annuel moyen entre zones observées précédemment pour la totalité des arbres (Figure 7) se reflètent également au niveau des espèces commerciales. Cependant, l'accroissement annuel moyen des espèces commerciales est incontestablement supérieur à celui de tous les arbres.

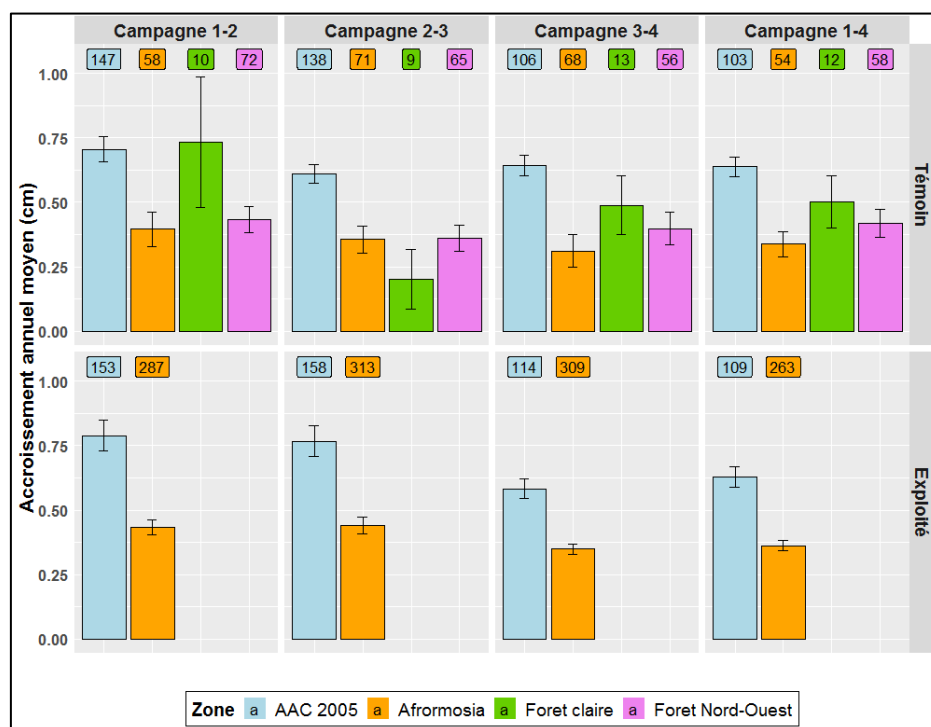


Figure 10 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) des espèces commerciales principales de chaque zone en fonction de la période d'accroissement et du traitement. Les effectifs qui ont servi à chaque calcul d'accroissement annuel moyen sont indiqués.

Lorsque l'on étudie l'accroissement annuel moyen de chaque espèce commerciale principale par période d'accroissement et par zone témoin ou exploitée (Annexe 9) les mêmes tendances que chez les arbres appartenant aux peuplements complets (Figure 7) ou au groupe des espèces commerciales (Figure 10) semblent se dégager. Cependant, sauf pour *Lophira alata* (AZO) et *Millettia laurentii* (WEN), les effectifs de ces espèces sont trop faibles pour pouvoir réellement conclure.

Comparaison de la croissance entre les traitements

Afin d'étudier l'effet de l'exploitation forestière sur les espèces commerciales plus en détail les analyses ont été faites sur les deux zones présentant à la fois des blocs témoins et exploités, c'est-à-dire les zones AAC 2005 et Afrormosia (Figure 11, 12 et 13).

Dans la zone AAC 2005, l'accroissement annuel moyen dans les blocs exploités est significativement supérieur à l'accroissement dans le bloc témoin uniquement lors de la campagne 2-3. Dans la zone Afrormosia aucune différence significative n'est observée (Figure 11).

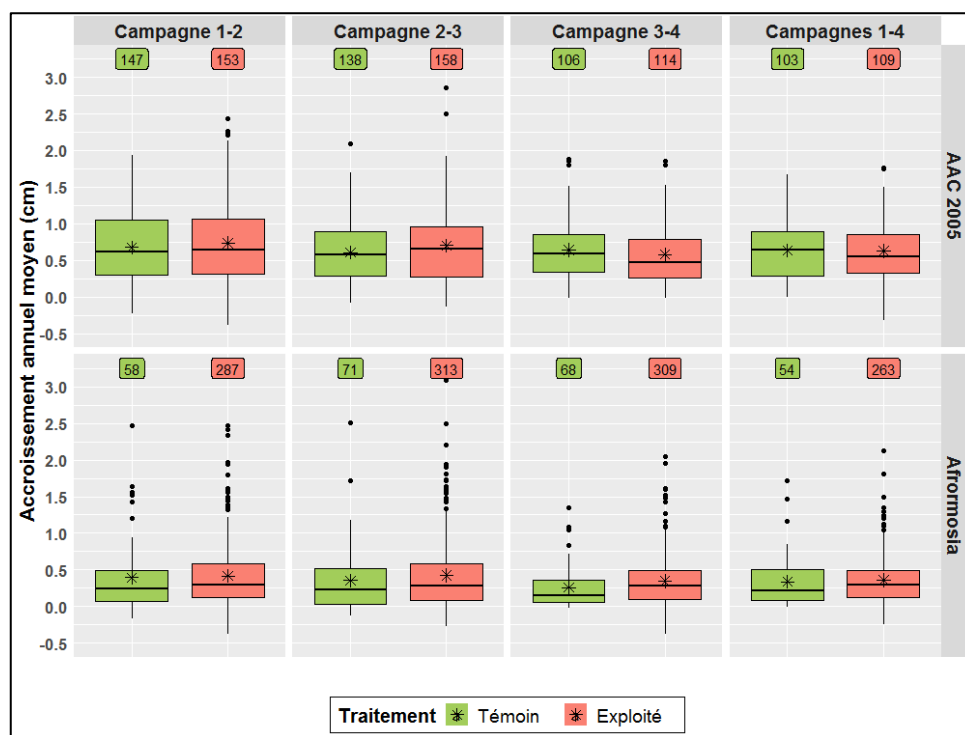


Figure 11 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) des espèces commerciales principales des zones AAC 2005 et Afrormosia en fonction de la période d'accroissement et du traitement. Les effectifs qui ont servi à l'élaboration de chacun des boxplots sont indiqués. Chaque * symbolise l'accroissement annuel moyen.

Dans chaque zone, les accroissements diamétriques des espèces commerciales les mieux représentées en effectifs dans les blocs témoins et exploités ont été illustrés (Figures 12 et 13). Ainsi, sur les 28 espèces appartenant au groupe des espèces commerciales principales (Annexe 1) seules *Lophira alata* (AZO), *Nesogordonia kabingaensis* (KOB), *Entandrophragma candollei* (KOS) et *Millettia laurentii* (WEN) ont été étudiées dans la zone AAC 2005 (Figure 12). Dans la zone Afrormosia, il s'agit de *Lophira alata* (AZO), *Eribroma oblongum* (EYO), *Nesogordonia kabingaensis* (KOB), *Entandrophragma cylindricum* (SAP) et *Millettia laurentii* (WEN) (Figure 13). *Nesogordonia kabingaensis* (KOB) et *Eribroma oblongum* (EYO) sont des espèces héliophiles. Les autres sont tolérantes à l'ombrage (Figure 6).

Dans la zone AAC 2005 (Figure 12), l'accroissement annuel moyen de *Lophira alata* (AZO), *Entandrophragma candollei* (KOS) et *Millettia laurentii* (WEN) ne varie pas significativement entre les campagnes d'inventaires ni entre les blocs témoins et exploités. En revanche l'accroissement annuel moyen de *Nesogordonia kabingaensis* (KOB) est significativement supérieur en traitement exploité lors de la campagne 2-3. Il semble donc y avoir un effet positif de l'exploitation sur l'accroissement de cette espèce mais les effectifs trop faibles lors des autres périodes d'accroissement ne nous permettent pas de l'affirmer avec certitude.

Dans la zone Afrormosia (Figure 13), l'accroissement annuel moyen de *Lophira alata* (AZO), *Eribroma oblongum* (EYO), *Entandrophragma cylindricum* (SAP) et *Millettia laurentii* (WEN) ne varie pas significativement entre les campagnes d'inventaires et entre les blocs témoin et exploité. En ce qui concerne *Nesogordonia kabingaensis* (KOB), les observations faites pour la zone AAC 2005 sont également valables pour la zone Afrormosia.

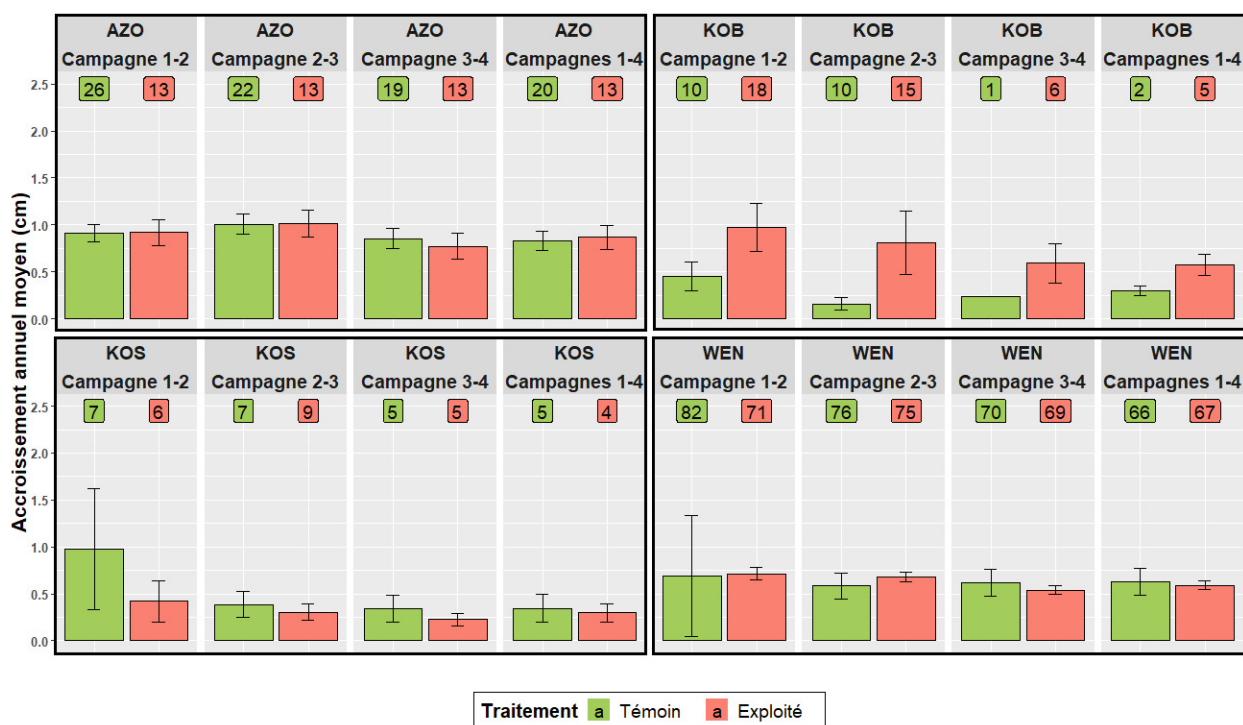


Figure 12 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) de quatre espèces commerciales principales présentes dans la zone AAC 2005 en fonction de la période d'accroissement et du traitement. Les effectifs qui ont servi à chaque calcul d'accroissement annuel moyen sont indiqués.

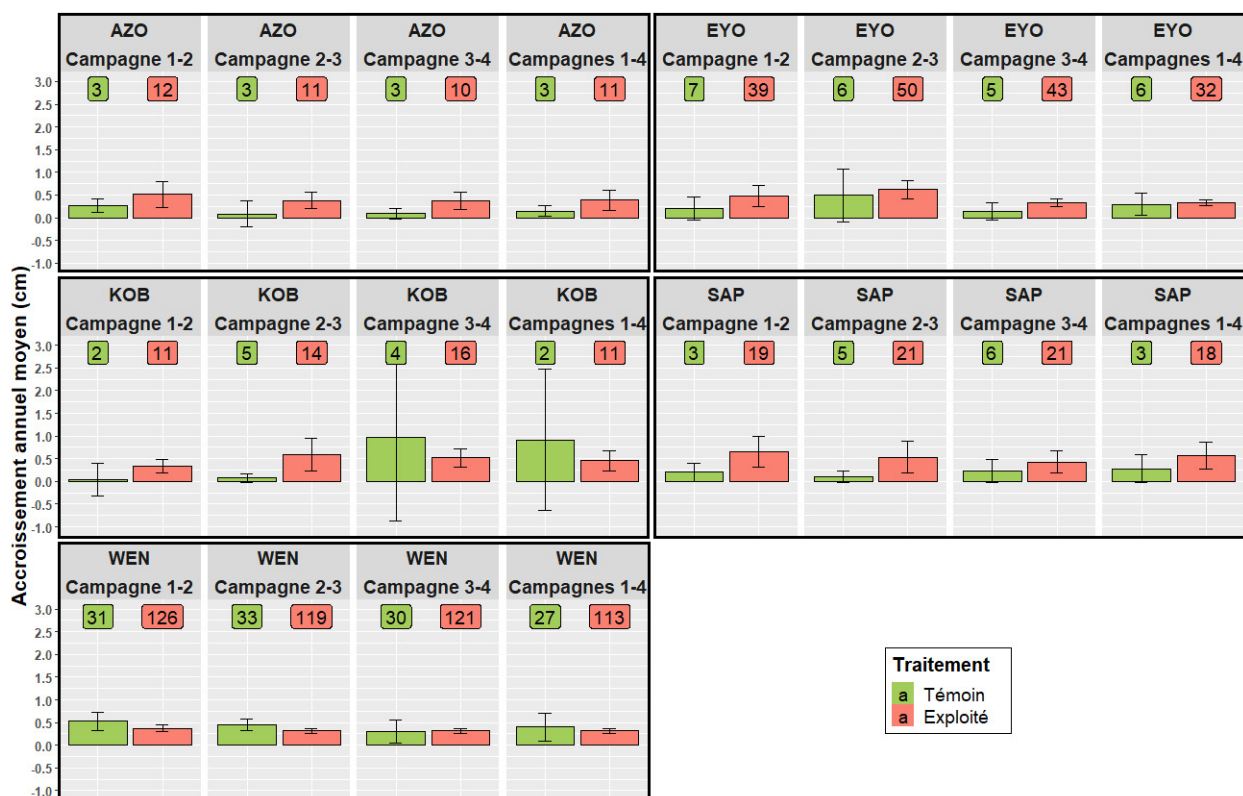


Figure 13 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) de cinq espèces commerciales principales présentes dans la zone Afrormosia en fonction de la période d'accroissement et du traitement. Les effectifs qui ont servi à chaque calcul d'accroissement annuel moyen sont indiqués.

L'effet de l'exploitation sur la croissance semble donc variable selon les espèces commerciales considérées. L'exploitation n'a probablement pas eu d'effet sur certaines espèces commerciales, notamment les héliophiles. Tandis que sur *Nesogordonia kabingaensis* (KOB), qui est tolérante à

l'ombrage, elle a pu avoir un effet favorable. Néanmoins, les effectifs trop peu suffisants pour certaines de ces espèces nous incitent à rester prudents quant à la fiabilité de l'ensemble de ces résultats.

Outre les effets de l'exploitation sur les espèces commerciales, nous pouvons à nouveau observer que les différences d'accroissement annuel moyen entre zones qui se manifestent chez les arbres appartenant aux peuplements complets (Figure 7) ou au groupe des espèces commerciales (Figure 10, Annexe 9), sont également visibles au niveau de certaines espèces. Effectivement, *Lophira alata* (AZO) et *Millettia laurentii* (WEN) ont un accroissement supérieur dans la zone AAC 2005 à celui observé dans la zone Afrormosia, et ce quel que soit le traitement (Figure 12 et 13).

Etude de l'effet de variables dendrométriques et environnementales sur la croissance des espèces commerciales principales

Faute d'effectifs suffisants dans toutes les zones d'inventaire pour la grande majorité des espèces commerciales, des modèles de croissance n'ont pu être testés que sur l'espèce *Millettia laurentii* (WEN).

Tous ces modèles reposent sur le même modèle commun (Tableau 4, *M1*). Dans ce modèle nous n'incluons pas la variable traitement (Trait) car elle ne présente aucun effet significatif (Tableau 4, *M2*). Il n'y a donc aucune différence d'accroissement entre l'ensemble des blocs témoins et exploités. Par conséquent il n'y a pas d'effet du temps écoulé depuis l'exploitation (Tps_expl). A ce modèle commun ont été ajoutées différentes variables climatiques pour tester leur part d'explication dans la variabilité de l'accroissement des arbres de l'espèce (Tableau 4, Annexe 10). Seul le meilleur modèle (AIC le plus faible), incluant la température journalière moyenne par période d'accroissement (Temp_moy), est présenté dans cette partie (Tableau 4, *M3*) même si d'autres variables climatiques ont un effet significatif (Annexe 10).

LogDiam a un effet négatif significatif ($P < 0,01$ *M3* ; $P < 0,01$ *M1* et *M2*) sur l'accroissement diamétrique annuel moyen. On observe également un effet significatif des zones : les arbres de cette espèce de la zone Forêt Nord-Ouest présentent un accroissement significativement inférieur ($P < 0,001$) à celui des arbres de la zone AAC 2005. En revanche, les arbres de cette espèce de la zone Afrormosia ne diffèrent pas significativement de la zone AAC 2005. L'interaction entre LogDiam et la zone Forêt Nord-Ouest a un effet positif significatif sur la croissance : l'accroissement en diamètre dans la zone Forêt Nord-Ouest augmente davantage que dans la zone AAC 2005, ce qui n'est pas le cas dans la zone Afrormosia pour laquelle l'interaction n'est pas significative. La variable climatique Temp_moy (Tableau 4, *M3*) a un effet significativement positif ($P < 0,001$ *M3*) sur l'accroissement annuel moyen. Plus la température journalière moyenne par période d'accroissement est élevée, plus l'accroissement en diamètre est important. Enfin, l'effet de l'individu (Ind) est significatif ($P < 0,001$) sur la variabilité de l'accroissement diamétrique annuel moyen des arbres appartenant à l'espèce *Millettia laurentii*.

Tableau 4 : Synthèse des paramètres des modèles reliant le logarithme de l'accroissement diamétrique annuel moyen de 371 *Millettia laurentii* (WEN) issus de peuplements complets à plusieurs variables explicatives : le diamètre (LogDiam), la zone, le traitement (Trait) et la variable climatique Temperature_moy. Les variances associées au facteur aléatoire Ind et à l'erreur résiduelle sont également présentées. "--" : absence de la variable dans le modèle concerné. Significativité statistique aux risques : 0,05 : "", 0,01 : "***", 0,001 : "****", non significatif : "ns".**

| <i>Variables explicatives</i> | | <i>M1</i> AIC = -238 | <i>M2</i> AIC = -230 | <i>M3</i> AIC = -251 |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Effets fixes</i> | Intercept | 0.7288 *** | 0.7307 *** | -1.7264 ** |
| | LogDiam | -0.0811 ** | -0.0814 ** | -0.0682 * |
| | Zone Afrormosia | ns | ns | ns |
| | Zone Forêt Nord-Ouest | -1.1842 *** | -0.2666 *** | -1.1569 *** |
| | Traitement témoin | -- | ns | -- |
| | Temp_moy | -- | -- | 0.0965 *** |
| | LogDiam : Zone Afrormosia | ns | ns | ns |
| LogDiam : Zone Forêt Nord-Ouest | 0.3361 *** | 0.3363 *** | 0.3317 *** | |
| <i>Effets aléatoires</i> | Ind (Intercept) | 0.0372 *** | 0.0373 *** | 0.0376 *** |
| | Erreur résiduelle | 0.0240 | 0.0240 | 0.0232 |

DISCUSSION

Le sol et la densité du peuplement peuvent avoir un effet sur la croissance

Les quatre zones de cette étude sont situées dans des environnements différents (Tableau 1). En fonction de son amplitude écologique une espèce peut se retrouver à divers endroits. Cependant, certaines zones sont plus propices à un meilleur accroissement (N'Guessen et Kouassi 2005). La croissance de chaque arbre est notamment dépendante du voisinage local et des ressources du sol (Baribault, Kobe, et Finley 2012; Ouedraogo 2008; Turner, Brenes-Arguedas, et Condit 2018; Zemunik, Davies, et Turner 2018) dont la disponibilité peut varier en fonction du substrat géologique (Fayolle et al. 2012). Les quatre zones de cette étude se caractérisent par des sols et des densités d'arbres initiales différentes (Tableau 1). L'effet Zone testé dans nos modèles traduit ces différences.

La densité des peuplements semble davantage traduire les différences d'accroissement entre les zones que le sol. Plus la densité d'arbres est élevée, plus l'accroissement est faible. Parmi les zones de plaines marécageuses (zones AAC 2005 et Afrormosia, Tableau 1), celle située sur alluvions inondables (zone Afrormosia) est plus dense et a une dynamique de croissance plus faible que la zone située sur sols gréseux (zone AAC 2005). Les zones Forêt Nord-Ouest et Afrormosia, de dynamiques de croissance et de densités semblables (430 arbres/ha) se trouvent sur des sols différents. A priori, la zone Forêt Nord-Ouest est la plus riche en calcium (sols schisto-calcaro-gréseux) et certains auteurs ont montré son influence positive sur la croissance (Turner, Brenes-Arguedas, et Condit 2018). Néanmoins la croissance dans cette zone ne diffère pas de celle dans la zone Afrormosia et est inférieure à celle observée dans les zones moins denses c'est-à-dire Forêt claire (28,5 arbres/ha) et AAC 2005 (219,7 arbres/ha). Un des facteurs les plus influents sur l'accroissement diamétrique est la compétition (N'Guessen et Kouassi 2005). Au sein d'un peuplement, les arbres sont en compétition pour acquérir les principaux facteurs limitants du métabolisme parmi lesquels la lumière (Claeys 2018) et les ressources édaphiques (Vanclay 1994). Cette compétition augmente avec la densité d'arbres.

Dans une moindre mesure, les arbres peuvent être en compétition avec d'autres types de végétaux. La zone Forêt claire est la zone la moins dense (28,5 arbres/ha) pourtant la croissance des arbres ne diffère pas de celle de la zone AAC 2005 (219,7 arbres/ha). Le sous-bois de ces deux zones est envahi par des plantes herbacées de la famille des Marantacées. Cependant, cet envahissement est beaucoup plus important dans la zone Forêt claire et pourrait davantage y limiter la croissance que dans la zone AAC 2005. Ces plantes exercent une très forte compétition, notamment à cause de leur encombrement racinaire (Doumenge 1992). Le développement des racines a une grande importance dans la capacité à capter les ressources édaphiques (Vanclay 1994). La compétition, entre les arbres du peuplement et d'autres types de végétaux, pourrait donc jouer un rôle important dans la dynamique de croissance de ces zones.

En l'absence de données précises sur la fertilité des sols, il est difficile d'affirmer si cette différence de croissance des arbres entre les zones provient effectivement de la compétition exercée ou de la richesse du substrat. En revanche, ces différences d'environnements entre les zones (Tableau 1) peuvent affecter, en partie, la composition et la structure des peuplements.

La composition et la structure des peuplements changent avec les zones et peuvent influencer la croissance

La composition floristique diffère entre les quatre zones d'étude. Comme explicité précédemment ces zones sont situées dans des environnements différents (Tableau 1). Selon la théorie du filtrage environnemental dans un pool d'espèces régional, l'assemblage local des espèces est décrit comme un échantillon du pool régional d'espèces « sélectionné » par un ensemble de filtres biotiques (par exemple le voisinage local) et abiotiques (par exemple le sol) (Laurans 2013). A cela vient s'ajouter l'effet des anciennes perturbations. L'histoire passée des peuplements contribue à leur composition (Morin-Rivat et al. 2017). Il n'est donc pas anormal, que ces quatre zones n'aient pas la même composition floristique et fonctionnelle (Figure 5, Annexe 4) (CIRAD 2014; Fayolle et al. 2014), ni la même composition en espèces commerciales principales (Figure 6, Annexe 5).

Un effet espèce important a été observé sur l'accroissement diamétrique annuel moyen (Tableau 3, Annexe 8). L'accroissement en diamètre varie en fonction de l'espèce considérée (N'Guessen et Kouassi 2005; Rüger et al. 2011) et de ses besoins en lumière qu'ils soient élevés (espèces héliophiles) ou faibles (espèces tolérantes à l'ombrage) (Rüger et al. 2011). Les espèces héliophiles ont généralement un potentiel d'accroissement en diamètre plus élevé que les espèces tolérantes à l'ombrage (Ligot et al. 2019) de par leur plus grande sensibilité à la disponibilité croissante des ressources (Baker, Swaine, et Burslem 2003). La zone Forêt Nord-Ouest est la zone la plus riche en espèces tolérantes à l'ombrage, ce qui pourrait en partie expliquer que l'accroissement observé y soit plus faible que dans les autres zones. De plus, la majorité des arbres appartenant au groupe des espèces commerciales sont héliophiles (Figure 6, Annexe 5) ce qui expliquerait que leur croissance soit supérieure à celle des arbres des peuplements complets qui sont majoritairement tolérants à l'ombrage dans toutes les zones.

L'histoire passée et l'environnement des peuplements contribuent également à leur structure (Morin-Rivat et al. 2017). C'est pourquoi les distributions diamétriques ne sont pas les mêmes entre les zones (Figure 4). Entre autre, les zones AAC 2005 et Forêt claire sont probablement dépourvues d'arbres appartenant à des classes de petit diamètre (Figure 4) en raison de la présence des Marantacées (Fayolle et al. 2014) qui limitent le recrutement.

La croissance dépend beaucoup du diamètre des arbres (Baribault, Kobe, et Finley 2012; Rüger et al. 2011; Vanclay 1994; Zemunik, Davies, et Turner 2018). D'après nos modèles (Tableaux 3 et 4) l'accroissement diamétrique est significativement inférieur pour les arbres de gros diamètre. Bien que l'importance des grands arbres en ce qui concerne le stock de carbone soit indéniable leur contribution à la production annuelle de biomasse au niveau du peuplement peut être limitée par rapport à celle des petits arbres (Ligot et al. 2018; Vanclay 1994). Cette tendance est en partie due à un taux de croissance relatif réduit des grands arbres (Ligot et al. 2018). Toutefois, des résultats contrastés peuvent être trouvés dans la littérature (Sheil et al. 2017). L'interaction entre LogDiam et la zone nous montre que l'accroissement diamétrique augmente plus rapidement pour les arbres de la zone Afrormosia que pour ceux de la zone AAC 2005 (Tableau 3, Annexe 8). Ceci peut être lié au fait que les petits arbres de la zone Afrormosia poussent mieux que ceux de la zone AAC 2005. Dans la zone AAC 2005, la croissance des arbres de petit diamètre peut être limitée à cause de la présence des Marantacées. En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les arbres des zones AAC 2005 et Forêt Nord-Ouest.

Comme observé dans nos modèles (Tableau 3, Annexe 8), les changements de croissance en diamètre en fonction de la taille des arbres sont variables d'une espèce à l'autre (LogDiam|Sp). La croissance peut donc dépendre du diamètre initial des arbres et des espèces, mais cette relation est aussi affectée par les conditions environnementales des zones ainsi que par leur histoire passée (Fayolle et al. 2014; Forni et al. 2015; Morin-Rivat et al. 2017; Rüger et al. 2011). A cela vient s'ajouter l'effet du climat.

Mais la croissance change aussi avec le climat

D'une année à l'autre les conditions climatiques peuvent beaucoup varier. Au cours de la période étudiée, plusieurs événements climatiques majeurs se sont produits, en particulier des événements El Niño. En Afrique centrale, les épisodes El Niño entraînent une augmentation de la température mais pas de diminution significative des précipitations (Malhi et Wright 2004). De 2000 à 2018, cinq événements El Niño ont été observés : en 2002-2003, 2004-2005, 2006-2007, 2009-2010 et 2014-2016, ce dernier faisant partie des plus forts jamais enregistrés. Les campagnes 1-2 et 2-3 ont été affectées par au moins deux phénomènes El Niño contre un seul pour la campagne 3-4 qui est la plus longue des trois périodes.

Les variations climatiques ont un effet sur la croissance en diamètre des arbres au cours du temps : les variations de température se sont avérées être les plus significatives (Tableaux 3 et 4). Pour les arbres du peuplement, l'écart maximum moyen de température, lors des saisons sèches principales d'une période d'accroissement, est la variable de température qui traduit le mieux la variabilité d'accroissement, même si les autres ont également un effet significatif (Annexe 8). Plus cet écart de température est élevé, plus l'accroissement est important. Un écart plus important correspond à des températures minimales légèrement plus élevées ainsi qu'à des températures maximales nettement plus élevées. Il s'agit donc d'une gamme de température plus large se situant dans des valeurs de température plus élevées. Pour les arbres de l'espèce *Millettia laurentii* la variable climatique ayant le plus d'effet est la température journalière moyenne par période d'accroissement : plus elle est importante pour une période donnée, plus l'accroissement en diamètre l'est également. On constate que les périodes d'accroissement les plus chaudes (Annexe 2), que ce soit pour les écarts de température moyens ou les températures annuelles moyennes, semblent correspondre aux périodes où les phénomènes El Niño ont été les plus fréquents c'est-à-dire les campagnes 1-2 et 2-3. Cette corrélation positive entre croissance et température contredit la plupart des résultats obtenus en Amazonie (Aubry-Kientz et al. 2019; Clark, Clark, et Oberbauer 2010; Doughty et Goulden 2008). L'augmentation de la température de l'air entraîne une accélération de la photosynthèse (Lewis et al. 2009) mais cette relation n'est pas linéaire. Les essences tropicales peuvent être proches d'un seuil de température élevé qui, s'il est dépassé, réduira considérablement leur croissance (Doughty et Goulden 2008). Les forêts amazoniennes auraient déjà franchi ce seuil, tandis que les forêts d'Afrique centrale pourraient encore être en dessous de celui-ci (Claeys et al. 2019).

Outre la température, le nombre de jours secs consécutifs maximal par période d'accroissement (Sec), soit la longueur de la sécheresse, a un effet négatif significatif sur l'accroissement. La croissance ralentit ou s'arrête complètement pendant la saison sèche (Clark, Clark, et Oberbauer 2010; Worbes 1999). Par conséquent, plus la saison sèche est longue plus la période de ralentissement de la croissance, voire d'interruption, l'est également et se reflète sur l'accroissement annuel moyen (Annexe 7). L'augmentation de la longueur et de l'intensité des épisodes de sécheresse constitue également une source majeure de mortalité des arbres (Claeys

2018). En revanche, le régime des précipitations annuelles (Pluie_an) n'influence pas de manière significative la croissance des arbres (Annexe 7). Soit la quantité de pluie n'est qu'un déterminant secondaire de la croissance, soit il existe une interaction avec d'autres facteurs climatiques (par exemple l'ensoleillement) ou les conditions stationnelles (par exemple le type de sol) qui empêche de détecter l'influence de la pluviosité sur la croissance (Ouedraogo 2008). C'est pourquoi nous avons testé l'effet de l'écart entre irradiance directe normalisée (DNI) et précipitations (Ecart_DNI_pluie), reflétant l'interaction entre ces deux variables climatiques.

L'écart entre DNI et précipitations a un effet significativement négatif, c'est-à-dire que plus cet écart est élevé, plus l'accroissement diamétrique annuel moyen diminue (Annexe 7). Un écart important correspond à des précipitations faibles et à un DNI élevé et inversement (Annexe 3). En Afrique centrale, on observe des saisons déficitaires en lumière. Ce climat légèrement déficient est dû à la formation de nébuleuses à basse altitude, ce qui réduit fortement la demande en eau et améliore la qualité de la lumière disponible pour la photosynthèse des arbres (Philippon et al. 2019). En effet toute atténuation de la lumière est associée à une fraction croissante de rayonnement diffus, ce qui augmente la photosynthèse (Lewis et al. 2009). Ainsi, lorsqu'une période d'accroissement a été plus déficitaire en lumière, et que les précipitations ont été plus abondantes, l'accroissement en diamètre annuel moyen a été plus important.

La température, l'intensité de la saison sèche et l'interaction entre lumière et précipitations semblent influencer la croissance des arbres. Cette influence dépend aussi de l'interaction de ces facteurs climatiques avec l'exploitation forestière.

L'exploitation forestière a stimulé la croissance, en fonction de son intensité et en interaction avec la zone et le climat

L'exploitation forestière a eu un effet sur la croissance des arbres dépendant de son intensité. Pour de faibles intensités d'exploitation (1 tige/ha), aucune différence avec les témoins n'est constatée (Figure 9). On peut supposer que l'exploitation d'une tige par hectare ne provoque pas une ouverture de canopée suffisante pour réduire l'effet de compétition existant entre les arbres. Toutefois, dans des peuplements plus denses que ceux étudiés, cette faible intensité d'exploitation pourrait avoir un effet en diminuant la compétition. A intensité d'exploitation moyenne (3 tiges/ha) l'accroissement annuel moyen augmente. Lorsque l'intensité d'exploitation s'élève à 5 et 9 tiges/ha cet accroissement augmente davantage (Figure 9). L'exploitation forestière augmente vraisemblablement la disponibilité des ressources pour les arbres restants et cet effet augmente avec son intensité (Demenois et al. 2003; Ligot et al. 2019). Elle réduit la compétition et permet aux arbres de profiter davantage des nutriments du sol et des ressources en eau. L'ouverture de la canopée qu'elle occasionne permet aussi un meilleur ensoleillement indispensable à la croissance (Herault et al. 2010; N'Guessen et Kouassi 2005). Toutefois une ouverture excessive n'a plus d'effet sur la croissance (Demenois et al. 2003). C'est probablement pour cette raison qu'il n'y aurait pas de différence significative entre des intensités d'exploitation de 5 et 9 tiges/ha (Figure 9).

L'effet de l'exploitation n'est pas le même entre les zones AAC 2005 et Afrormosia : dans la première elle a un effet positif sur l'accroissement en diamètre et dans la seconde elle n'a pas d'effet (Figure 8). Aucun effet de l'exploitation n'aurait été observé dans la zone Afrormosia car les arbres présents dans les placettes ayant subi une forte intensité d'exploitation sont peu nombreux (20% des arbres). La majorité des arbres dans les blocs exploités de cette zone ont

subi une intensité d'exploitation faible ou nulle (0 tiges/ha) et leur accroissement en diamètre ne diffère pas des arbres présents dans le bloc témoin, comme expliqué précédemment. Si le nombre d'arbres ayant subi une forte intensité d'exploitation avait été plus important, l'effet de l'exploitation sur l'ensemble des arbres du peuplement aurait peut-être été visible. A l'inverse, l'effet de l'exploitation serait visible dans la zone AAC 2005 car les intensités d'exploitation entraînant une augmentation de l'accroissement (0 tige/ha sur bloc exploité et 3 tiges/ha, Figure 9) sont bien représentées en termes d'effectifs d'arbres. Les effectifs d'arbres se trouvant en condition d'intensité d'exploitation moyenne (3 tiges/ha) sont équivalents aux effectifs d'arbres se trouvant en condition de faible intensité d'exploitation (1 tige/ha) (Figure 9). De plus, les arbres en condition « 0 tige/ha sur bloc exploité » ont un accroissement élevé, significativement semblable à l'accroissement des arbres ayant subi une intensité d'exploitation de 3 tiges/ha. Même si aucun arbre n'a été abattu dans ces placettes, l'effet de l'exploitation y est visible de par la présence de pistes d'exploitation qui ont ouvert le milieu.

L'exploitation forestière a joué sur la croissance en fonction de son intensité mais également en interaction avec la zone. Dans nos modèles, l'intensité d'exploitation (Intens) ne présente pas d'effet significatif sur l'accroissement en diamètre (Tableau 3 et Annexe 8). Ceci serait lié au fait que l'effet de l'intensité d'exploitation dépend de la zone considérée (Figure 9), notamment du type de sol et de la densité d'arbres initiale. A titre d'exemple, si l'intensité d'exploitation de 3 tiges/ha avait été appliquée dans la zone Afrormosia, l'accroissement observé n'aurait sans doute pas été le même que celui de la zone AAC 2005.

Toutefois, le temps écoulé depuis l'exploitation a un effet significatif dans nos modèles : plus on s'éloigne dans le temps de l'année d'exploitation, plus l'accroissement en diamètre diminue. L'effet stimulant de l'exploitation est limité dans le temps : il se maintient une dizaine d'années. De plus, cet effet s'amointrit au fil des années (Bedel et al. 1998; Demenois et al. 2003; Ligot et al. 2019; N'Guessen et Kouassi 2005). L'interaction entre l'intensité et le temps écoulé depuis l'exploitation (Intens : Tps_expl) a un effet significativement négatif sur l'accroissement en diamètre. Plus l'intensité d'exploitation est forte, plus l'accroissement augmente mais durant un temps plus court. Lorsque l'exploitation induit une ouverture trop importante, cela favorise une invasion rapide des peuplements par des espèces pionnières et héliophiles (Demenois et al. 2003) entraînant une forte augmentation de la compétition et donc une réduction de l'accroissement des arbres.

L'effet stimulant de l'exploitation est également fonction du diamètre des arbres et de l'espèce (Demenois et al. 2003; Herault et al. 2010). Il existe une interaction positive entre le diamètre et l'intensité d'exploitation (LogDiam : Intens) : plus le diamètre et l'intensité d'exploitation sont importants, plus l'accroissement l'est également (Tableau 3, Annexe 8). L'effet de l'exploitation est variable selon les classes de diamètre considérées : ce sont les arbres les plus petits qui réagissent le plus (Annexe 7) (Demenois et al. 2003). Cependant, les arbres de gros diamètre montrent une réaction positive lorsque l'intensité d'exploitation est suffisamment importante. La lumière est probablement la ressource la plus limitante de la croissance des arbres. Dans la canopée, où les grands arbres sont dominants, la compétition pour la lumière est restreinte et l'abattage d'un seul arbre n'aura que peu d'effet. En revanche l'abattage d'un nombre d'arbres plus élevé peut permettre de lever davantage de contraintes. Par exemple, une ouverture étendue de la canopée peut permettre l'extension du houppier des grands arbres restants, favorisant in fine leur accroissement. Pour les petits arbres qui n'atteignent pas la canopée, l'accès à la lumière est très restreint (Zemunik, Davies, et Turner 2018) et la compétition est très forte.

L'abattage de très peu d'arbres peut donc suffire à lever cette compétition et favoriser la croissance de ces petits arbres.

Bien que des réactions positives à l'exploitation forestière, en fonction de son intensité, aient été observées au niveau des arbres du peuplement, des réponses variables peuvent être attendues pour différentes espèces ou groupes fonctionnels (Gourlet-Fleury et al. 2013). Les arbres appartenant au groupe des espèces commerciales sont peu sensibles à l'exploitation (Figure 11). Chez *Millettia laurentii*, qui est une espèce héliophile, l'exploitation n'a aucun effet significatif sur l'accroissement en diamètre (Tableau 4). En revanche, l'exploitation favoriserait la croissance de *Nesogordonia kabingaensis* (KOB) (Figures 12 et 13), qui est une espèce tolérante à l'ombrage. Ceci peut être lié au fait que l'exploitation forestière favorise davantage le recrutement que la croissance adulte chez les arbres d'espèces commerciales à croissance rapide alors que les espèces à croissance lente profiteront de l'ouverture qu'offrent les trouées d'exploitation (Herault et al. 2010).

Enfin, il existe un effet de l'interaction entre le temps écoulé depuis l'exploitation (Tps_expl) et les variables climatiques sur l'accroissement diamétrique annuel moyen (Tableaux 3 et 4, Annexes 8 et 10) : plus le temps après exploitation est long, plus les effets (positifs ou négatifs) de la variable climatique sur l'accroissement augmentent. Nous pouvons émettre l'hypothèse que l'effet du climat sur l'accroissement subsiste mais qu'il est masqué par l'effet de l'exploitation car les arbres auraient avant tout besoin d'un accès à la lumière. Cependant, au fil des années, l'effet de l'exploitation diminue, car la lumière redevient limitante, donc l'effet du climat réapparaît.

Les limites des dispositifs permanents de la compagnie IFO et de notre étude

Malgré l'effort considérable dont a fait preuve la compagnie IFO pour l'installation de ses dispositifs permanents de suivi, plusieurs problèmes rendent l'analyse des données compliquée. Tout d'abord les placettes d'un hectare ne sont pas suffisamment grandes pour l'étude des peuplements complets (Figure 2), notamment si l'on souhaite étudier et modéliser les phénomènes de compétition veulent être étudiés et modélisés. De plus, ces surfaces restreintes ne permettent pas d'acquérir suffisamment de données pour l'étude des espèces commerciales. Des effectifs insuffisants, pour la grande majorité de ces espèces, ne nous ont pas permis de conclure quant à l'effet de l'environnement et de l'exploitation sur celles-ci.

Dans les blocs exploités, la première période d'accroissement (Campagne 1-2) confond les traitements témoin et exploité puisque l'exploitation a eu lieu entre les campagnes d'inventaires 1 et 2. Ainsi, l'effet de l'exploitation dans ces blocs était davantage significatif dans les modèles lorsque l'on supprimait la première période d'accroissement. La campagne 1, qui est témoin, perturbe l'effet de l'exploitation qui se manifeste plus tardivement dans cette période d'accroissement. C'est probablement pour cette raison qu'il y a un effet de l'exploitation dans la zone AAC 2005, sauf lors de la campagne 1-2 (Figure 8). Pour observer la différence d'accroissement diamétrique entre avant et après l'exploitation il aurait fallu que la deuxième campagne d'inventaire ait lieu juste avant l'exploitation. La campagne 1-2 aurait été entièrement témoin et la campagne 2-3 en condition entièrement exploitée.

Plusieurs anomalies ont été détectées dans les données et sont directement issues d'erreurs commises pendant les campagnes d'inventaires. Un nombre conséquent d'arbres disparaît d'un inventaire à l'autre, sans que nous sachions s'ils sont morts, ont été oubliés ou non retrouvés. Certains arbres sont notés comme étant morts lors d'une campagne, puis sont retrouvés lors de la campagne suivante : cela occasionne des pertes de données pour certaines campagnes. Tandis que d'autres arbres sont identifiés en tant que recrutés alors que leur diamètre dépasse largement le diamètre de recrutement. On peut donc se demander s'il s'agit bien d'un nouvel arbre recruté, d'un arbre oublié depuis le début des inventaires ou d'un arbre mesuré à une campagne d'inventaire x , oublié à la campagne $x+1$, puis retrouvé et identifié comme un nouvel arbre recruté à la campagne $x+2$. Ainsi, les campagnes d'inventaire n'ayant pas eu lieu tous les ans rendent la détection des erreurs difficile et nous obligent à éliminer les données qui ne sont pas fiables. Par conséquent une analyse de la dynamique de recrutement ou de mortalité n'est pas possible. Seule une analyse de la dynamique de croissance est possible en supposant que les arbres étudiés sont représentatifs de tout le peuplement.

L'un des principaux inconvénients de notre approche est que certaines variables environnementales potentiellement importantes n'ont pas été mesurées. Entre autres, la disponibilité en éléments nutritifs, comme par exemple le phosphore, a souvent été mise en avant comme facteur majeur de la dynamique forestière dans les forêts tropicales (Aubry-Kientz et al. 2019; Baribault, Kobe, et Finley 2012; Turner, Brenes-Arguedas, et Condit 2018). A cela s'ajoute la non prise en compte de la texture du sol, de l'humidité du sol ou encore de la compétition dans le sol (Rüger et al. 2011; Turner, Brenes-Arguedas, et Condit 2018). Or, des différences de caractéristiques entre les sols impliquent différentes stratégies de conservation et de gestion (Fayolle et al. 2012), d'où l'importance d'étudier leur effet sur la dynamique. Outre les variables concernant le sol la grande quantité de variance inexplicée peut également être due à l'identité des arbres voisins, à la variabilité génétique au sein d'une espèce (Ligot et al. 2019; Rüger et al. 2011) ou au tempérament des espèces. Enfin, d'autres variables climatiques auraient pu être étudiées comme par exemple les précipitations totales en saison sèche, la température nocturne ou le CO₂ atmosphérique annuel (Clark, Clark, et Oberbauer 2010).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les dispositifs de la compagnie IFO sont situés dans des environnements différents, induisant des dynamiques de croissance différentes. Le sol, la densité d'arbres, la structure, la composition et le fonctionnement contrastés des types de forêts peuvent entraîner des différences marquées dans les processus de croissance (Fayolle et al. 2014). L'accroissement des arbres tropicaux dépend également des conditions climatiques (Aubry-Kientz et al. 2019). Les projections relatives au changement climatique montrent une augmentation générale de la croissance (Claeys et al. 2019) pouvant être principalement liée à une élévation des températures.

Après exploitation, la croissance augmente avec son intensité mais durant un temps plus court à cause de la compétition qui s'accroît rapidement. De plus, l'effet de l'exploitation est en interaction avec le type de sol, la densité d'arbres, la structure, la composition floristique et le climat. Il serait intéressant d'étudier l'effet de l'exploitation dans les zones Forêt claire et Forêt Nord-Ouest afin de mieux comparer l'effet de l'environnement au sein de la concession de la compagnie IFO. Nos résultats suggèrent qu'augmenter l'intensité d'abattage pour augmenter la lumière dans les peuplements et stimuler la croissance est réalisable. Toutefois il est conseillé de ne pas dépasser quatre arbres/ha car au-delà de ce nombre, le rétablissement de la biomasse pourrait être insuffisant (Gourlet-Fleury et al. 2013). Une telle intensité d'abattage devrait cibler le plus grand nombre possible d'espèces afin de limiter la pression exercée sur une seule espèce (Gourlet-Fleury et al. 2013; Karsenty et Gourlet-Fleury 2006). Cependant, il y a peu de chance que le même nombre d'arbres abattus soit retrouvé dans 30 ans (Gourlet-Fleury et al. 2013), raison pour laquelle un taux de reconstitution des stocks de 55 % a été visé.

La compréhension des changements au niveau du peuplement nécessite des connaissances sur les changements de dynamique propres à une espèce (Claeys et al. 2019; Groenendijk et al. 2015). La grande diversité des espèces des forêts tropicales a empêché la réalisation d'analyses au niveau des espèces dans les placettes de petite taille (Picard et Gourlet-Fleury 2008). Pour cette raison, les études sur les réponses des espèces individuelles à l'exploitation ne sont pas très fréquentes sous les tropiques. C'est pourquoi on ignore en grande partie comment la croissance des espèces varie en fonction de la disponibilité des ressources, de la taille de l'arbre, du climat (Claeys et al. 2019; Groenendijk et al. 2015; Rüger et al. 2011) ou encore de l'intensité de l'exploitation. Sans compréhension de l'influence de ces facteurs et sans adaptation, les pratiques actuelles, même sous aménagement, risquent de conduire à une dégradation des peuplements forestiers (Claeys 2018; Ligot et al. 2019). À mesure que davantage de données d'inventaire deviennent disponibles, la quantification de ces effets environnementaux et anthropiques pourrait être possible pour plusieurs espèces commerciales, dans différents sites, afin d'améliorer les règles de gestion forestière (Ligot et al. 2019).

BIBLIOGRAPHIE

- ATIBT. 2016. « Rapport d'activité 2016 ». Nogent-sur-Marne, France. <https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2017/04/ATIBT-RAPPORT-ACTIVITE-2016-FRANCAIS-INTERNET.pdf>.
- Aubry-Kientz, Méline, Vivien Rossi, Guillaume Cornu, Fabien Wagner, et Bruno Héroult. 2019. « Temperature Rising Would Slow down Tropical Forest Dynamic in the Guiana Shield ». *Scientific Reports* 9 (1): 10235. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46597-8>.
- Baker, Timothy R., Michael D. Swaine, et David F. R. P. Burslem. 2003. « Variation in tropical forest growth rates: combined effects of functional group composition and resource availability ». *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 6 (1): 21- 36. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00040>.
- Baribault, Thomas W., Richard K. Kobe, et Andrew O. Finley. 2012. « Tropical Tree Growth Is Correlated with Soil Phosphorus, Potassium, and Calcium, Though Not for Legumes ». *Ecological Monographs* 82 (2): 189- 203. <https://doi.org/10.1890/11-1013.1>.
- Bedel, Frédéric, Luc Durrieu de Madron, Bernard Dupuy, Vincent Favrichon, Henri Felix Maitre, Avner Bar Hen, et Philippe Narboni. 1998. « Dynamique de croissance dans des peuplements exploités et éclaircis de forêt dense africaine. Le dispositif de M'Baïki en République Centrafricaine ». CIRAD-Forêt Campus International de Baillarguet BP 5035 34032 Montpellier cedex 1 France. <http://forafri.cirad.fr/ressources/forafri/02.pdf>.
- Bernard, Amélie. 2013. « Evaluation de la dynamique forestière et sa variabilité dans les forêts denses humides semi-décidues du Bassin du Congo ». Mémoire de stage.
- Bertrand, Frédéric. 2010. « Choix du modèle ». IRMA, Université de Strasbourg, France.
- Brouwer, Meindert. 2017. *Les forêts d'Afrique centrale pour toujours*. Bunnik, the Netherlands: Meindert Brouwer.
- Carreño-Rocabado, Geovana, Marielos Peña-Claros, Frans Bongers, Alfredo Alarcón, Juan-Carlos Licona, et Lourens Poorter. 2012. « Effects of Disturbance Intensity on Species and Functional Diversity in a Tropical Forest ». *Journal of Ecology* 100 (6): 1453- 63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.02015.x>.
- CIRAD. 2014. « DynAfFor - Dynamique des forêts d'Afrique centrale ». 2014. <https://www.dynaffor.org/>.
- Claeys, Florian. 2018. « Impacts du changement climatique sur la durabilité de l'exploitation forestière en Afrique centrale ». Sciences de l'environnement, AgroParisTech.
- Claeys, Florian, Sylvie Gourlet-Fleury, Nicolas Picard, Dakis-Yaoba Ouédraogo, Mahlet G. Tadesse, Bruno Héroult, Fidèle Baya, Fabrice Bénédet, Guillaume Cornu, et Frédéric Mortier. 2019. « Climate Change Would Lead to a Sharp Acceleration of Central African Forests Dynamics by the End of the Century ». *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb81>.
- Clark, David B., Deborah A. Clark, et Steven F. Oberbauer. 2010. « Annual Wood Production in a Tropical Rain Forest in NE Costa Rica Linked to Climatic Variation but Not to Increasing CO₂ ». *Global Change Biology* 16 (2): 747- 59. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02004.x>.
- CM SAF. s. d. « EUMETSAT CM SAF Climate Monitoring ». https://www.cmsaf.eu/EN/Overview/Overview_node.html.
- Condit, R., B. M. J. Engelbrecht, D. Pino, R. Perez, et B. L. Turner. 2013. « Species Distributions in Response to Individual Soil Nutrients and Seasonal Drought across a Community of Tropical Trees ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (13): 5064- 68. <https://doi.org/10.1073/pnas.1218042110>.

- Couturier, Antoine, et Tom Van Loon. 2008. « Disposition de suivi de l'écosystème et des essences forestières dans des Placettes Permanentes ». UFA Ngombé, République du Congo.
- Demenois, Julien, Sylvie Gourlet-Fleury, Marc Fuhr, et Jean-Gaël Jourget. 2003. « Sylviculture en forêt tropicale humide guyanaise ». *Revue Forestière Française*, n° numéro spécial 2003: 273- 90. <https://doi.org/DOI: 10.4267/2042/5778>.
- Doughty, Christopher E., et Michael L. Goulden. 2008. « Are Tropical Forests near a High Temperature Threshold?: TEMPERATURE EFFECTS ON TROPICAL FORESTS ». *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113 (G1): n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007JG000632>.
- Doumenge, Charles. 1992. « La Réserve de Conkouati: Congo Le secteur sud-ouest », 241.
- FAO. 2011. « La situation des forêts dans le bassin amazonien, le bassin du Congo et l'Asie du Sud-Est ». Brazzaville, République du Congo.
- . 2015. *Évaluation des ressources forestières mondiales 2015: Répertoire de données de FRA 2015*.
- . 2016. *Évaluation des ressources forestières mondiales 2015: Comment les forêts de la planète changent-elles? Deuxième édition*.
- Favrichon, Vincent, S Gourlet-Fleury, Avner Bar Hen, et Hélène Dessard. 1998. « Parcelles permanentes de recherche en forêt dense tropicale humide. » CIRAD-Forêt.
- Fayolle, Adeline, Bettina Engelbrecht, Vincent Freycon, Frédéric Mortier, Michael Swaine, Maxime Réjou-Méchain, Jean-Louis Doucet, Nicolas Fauvet, Guillaume Cornu, et Sylvie Gourlet-Fleury. 2012. « Geological Substrates Shape Tree Species and Trait Distributions in African Moist Forests ». Édité par James F. Cahill. *PLoS ONE* 7 (8): e42381. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042381>.
- Fayolle, Adeline, Nicolas Picard, Jean-Louis Doucet, Michael Swaine, Nicolas Bayol, Fabrice Bénédet, et Sylvie Gourlet-Fleury. 2014. « A New Insight in the Structure, Composition and Functioning of Central African Moist Forests ». *Forest Ecology and Management* 329: 195- 205. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.014>.
- FFEM. 2011. « Les actions du FFEM pour conserver la biodiversité du Bassin du Congo. » Collection « Evaluation rétrospective, Capitalisation des expériences ». Paris.
- Forest Stewardship Council. 2018. « La certification FSC ». FSC FRANCE. 2018. <https://fr.fsc.org/fr-fr/certification>.
- Forni, E, K Dainou, S Gourlet-Fleury, S Bauwens, G J Loubota, A Fayolle, C Douh, A Biwolé, V Feycon, et C Bracke. 2015. « Rapport annuel - 2014. Projet DynAffor ».
- Gourlet-Fleury, S., F. Mortier, A. Fayolle, F. Baya, D. Ouedraogo, F. Benedet, et N. Picard. 2013. « Tropical Forest Recovery from Logging: A 24 Year Silvicultural Experiment from Central Africa ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368 (1625). <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0302>.
- Grimaud, Antoine. 2012. « L'AFD et les forêts tropicales humides: pour une gestion durable d'une ressource exceptionnelle dans le Bassin du Congo », Collection publications sectorielles, géographique ou thématique, , 6.
- Groenendijk, Peter, Peter van der Sleen, Mart Vlam, Sarayudh Bunyavejchewin, Frans Bongers, et Pieter A. Zuidema. 2015. « No Evidence for Consistent Long-Term Growth Stimulation of 13 Tropical Tree Species: Results from Tree-Ring Analysis ». *Global Change Biology* 21 (10): 3762- 76. <https://doi.org/10.1111/gcb.12955>.
- Groutel, Emmanuel. 2018. « Quid du futur des concessions forestières africaines dans le Bassin du Congo ? » Technical report. NIMEC (UPRES-EA 969) IAE de CAEN. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26589.10726>.
- Herault, Bruno, Julia Ouallet, Lilian Blanc, Fabien Wagner, et Christopher Baraloto. 2010. « Growth Responses of Neotropical Trees to Logging Gaps ». *Journal of Applied Ecology* 47 (4): 821- 31. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01826.x>.

- Huntington, Justin, John Abatzoglou, Katherine Hegewisch, Britta Daudert, Charles Morton, et Dan McEvoy. s. d. « Climate Engine ». <https://clim-engine.appspot.com/>.
- IFO, et Foret Ressources Management. 2015. « PLAN D'AMENAGEMENT DE L'UFA NGOMBE Période 2007-2036 ». Résumé Public. République du Congo.
- Jacquet, K, et R Prodon. 2014. « Analyses multivariées avec ade4 dans R », 32.
- Karsenty, Alain, Paolo Omar Cerutti, Jean-Louis Doucet, Francis E. Putz, Claudia Romero, C. Bernard, R. Eba'a Atyi, et al. 2016. « L'aménagement forestier au Congo engendre-t-il plus de déforestation ? », 17. <https://doi.org/10.18167/agritrop/00001>.
- Karsenty, Alain, et Sylvie Gourlet-Fleury. 2006. « Assessing Sustainability of Logging Practices in the Congo Basin's Managed Forests: The Issue of Commercial Species Recovery ». *Ecology and Society* 11 (1): 13. <https://doi.org/10.5751/ES-01668-110126>.
- Kleinschroth, Fritz, Sylvie Gourlet-Fleury, Plinio Sist, Frédéric Mortier, et John R. Healey. 2015. « Legacy of Logging Roads in the Congo Basin: How Persistent Are the Scars in Forest Cover? » *Ecosphere* 6 (4): art64. <https://doi.org/10.1890/ES14-00488.1>.
- Laurans, Marilyne. 2013. « Rôle de la lumière dans la coexistence des espèces d'arbres de forêt tropicale humide: analyse des variations inter- et intra-spécifiques des performances et des traits fonctionnels. » Biodiversité et Ecologie, Montpellier: Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques.
- Lavergne, C., et C. Trottier. 2000. « Sur l'estimation dans les modèles linéaires généralisés à effets aléatoires ». *Revue de statistique appliquée* 48 (1): 49- 67.
- Lewis, Simon L., Jon Lloyd, Stephen Sitch, Edward T.A. Mitchard, et William F. Laurance. 2009. « Changing Ecology of Tropical Forests: Evidence and Drivers ». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40 (1): 529- 49. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173345>.
- Ligot, Gauthier, Adeline Fayolle, Sylvie Gourlet-Fleury, Kasso Dainou, Jean-François Gillet, Maaïke De Ridder, Thomas Drouet, Peter Groenendijk, et Jean-Louis Doucet. 2019. « Growth Determinants of Timber Species *Triplochiton Scleroxylon* and Implications for Forest Management in Central Africa ». *Forest Ecology and Management* 437: 211- 21. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.042>.
- Ligot, Gauthier, Sylvie Gourlet-Fleury, Dakis-Yaoba Ouédraogo, Xavier Morin, Sébastien Bauwens, Fidele Baya, Yves Brostaux, Jean-Louis Doucet, et Adeline Fayolle. 2018. « The Limited Contribution of Large Trees to Annual Biomass Production in an Old-Growth Tropical Forest ». *Ecological Applications* 28 (5): 1273- 81. <https://doi.org/10.1002/eap.1726>.
- Lorent, Romain. 2016. « Coopération financière COMIFAC – Allemagne Programme de « Promotion de l'exploitation certifiée des forêts » ». Rapport semestriel 9ème. Allemagne.
- Maley, Jean. 1990. « Histoire récente de la forêt dense humide africaine : essai sur le dynamisme actuel de quelques formations forestières ». In *Paysages quaternaires de l'Afrique Centrale Atlantique*, 367- 89. Didactiques. Paris: Editions de l'ORSTOM.
- Malhi, Yadvinder, et James Wright. 2004. « Spatial Patterns and Recent Trends in the Climate of Tropical Rainforest Regions ». Édité par Y. Malhi et O. L. Phillips. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 359 (1443): 311- 29. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1433>.
- Martinez, Marie-José. 2006. « Modèles linéaires généralisés à effets aléatoires: contributions au choix de modèle et au modèle de mélange ». Mathématiques [math], Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.
- Morin-Rivat, Julie, Adeline Fayolle, Charly Favier, Laurent Bremond, Sylvie Gourlet-Fleury, Nicolas Bayol, Philippe Lejeune, Hans Beeckman, et Jean-Louis Doucet. 2017. « Present-Day Central African Forest Is a Legacy of the 19th Century Human History ». *ELife* 6 (janvier): e20343. <https://doi.org/10.7554/eLife.20343>.

- N'Guessen, K. E., et R.H. Kouassi. 2005. « Accroissement en diamètre d'essences forestières au sein de trois périmètres expérimentaux (Mopri, Téné et Irobo) en Côte d'Ivoire ». *Agronomie Africaine* 17 (2): 91- 102. <https://doi.org/10.4314/aga.v17i2.1661>.
- NOAA. s. d. « Climate Forecast System (CFS) ». <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2>.
- OIBT. 2005. « Critères et indicateurs révisés de l'OIBT pour l'aménagement durable des forêts tropicales : modèle de rapport sur les C&I inclus ». Série OIBT : Politique forestière n°15. Yokohama, Japon. https://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=9630000&no=2&_lang=fr&disp=inline.
- . 2016. « Critères et indicateurs de la gestion durable des forêts tropicales ». Série OIBT : Politique forestière n°21. Yokohama, Japon. https://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=4872&no=1&_lang=fr&disp=inline.
- . 2017. *Revue biennale et évaluation de la situation mondiale des bois 2015-2016*. Yokohama, Japon. https://www.itto.int/fr/annual_review/.
- Ouedraogo, D. 2008. « Pluviosité et croissance radiale annuelle des arbres d'une forêt semi décidue en République centrafricaine ». Mémoire de stage.
- « P3FAC ». s. d. *ATIBT* (blog). Consulté le 12 mars 2019. <https://www.atibt.org/fr/projet/p3fac/>.
- Philippon, Nathalie, Guillaume Cornu, Lou Monteil, Valéry Gond, Vincent Moron, Julien Pergaud, Geneviève Sèze, et al. 2019. « The Light-Deficient Climates of Western Central African Evergreen Forests ». *Environmental Research Letters* 14 (3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5d8>.
- Picard, Nicolas. 2007. « Dispositifs permanents pour le suivi des forêts en Afrique Centrale: un état des lieux ». Rapport pour la COMIFAC. <http://hal.cirad.fr/cirad-00146347>.
- Picard, Nicolas, et Sylvie Gourlet-Fleury. 2008. « Manuel de référence pour l'installation de dispositifs permanents en forêt de production dans le Bassin du Congo ». COMIFAC.
- Picard, Nicolas, Sylvie Gourlet-Fleury, et Éric Forni. 2012. « Estimating Damage from Selective Logging and Implications for Tropical Forest Management ». *Canadian Journal of Forest Research* 42 (3): 605- 13. <https://doi.org/10.1139/x2012-018>.
- Rüger, Nadja, Uta Berger, Stephen P. Hubbell, Ghislain Vieilledent, et Richard Condit. 2011. « Growth Strategies of Tropical Tree Species: Disentangling Light and Size Effects ». Édité par Enrico Scalas. *PLoS ONE* 6 (9): e25330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025330>.
- Sheil, Douglas, Chris S. Eastaugh, Mart Vlam, Pieter A. Zuidema, Peter Groenendijk, Peter van der Sleen, Alex Jay, et Jerome Vanclay. 2017. « Does Biomass Growth Increase in the Largest Trees? Flaws, Fallacies and Alternative Analyses ». Édité par Markku Larjavaara. *Functional Ecology* 31 (3): 568- 81. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12775>.
- Turner, Benjamin L., Tania Brenes-Arguedas, et Richard Condit. 2018. « Pervasive Phosphorus Limitation of Tree Species but Not Communities in Tropical Forests ». *Nature* 555 (7696): 367- 70. <https://doi.org/10.1038/nature25789>.
- Vanclay, Jerome K. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*. Wallingford, U.K: CAB International.
- Wasseige, Carlos de, J Flynn, D Louppe, F Hiol Hiol, et Ph Mayaux. 2014. *Les forêts du bassin du Congo - Etat des Forêts 2013*. Weyrich. Belgique. <https://www.observatoire-comifac.net/publications/edf/2013>.
- Wasseige, Carlos de, M Tadoum, Richard Eba'a Atyi, Ch Doumenge, Observatory for the Forests of Central Africa, et Congo Basin Forest Partnership. 2015. *Les forêts du bassin du Congo: forêts et changements climatiques*. Weyrich. Belgique.

- Win, R Ne, R Suzuki, et S Takeda. 2012. « Effects of Selective Logging on the Regeneration of Two Commercial Tree Species in the Kabaung Reserved Forest, Bago Mountains, Myanmar ». *Journal of Tropical Forest Science* 24 (3): 312- 21.
- Worbes, Martin. 1999. « Annual Growth Rings, Rainfall- dependent Growth and Long- term Growth Patterns of Tropical Trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela ». *Journal of Ecology* 87 (3): 391- 403. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00361.x>.
- Wu, Lichao, Jie Liu, Atsushi Takashima, Keiichi Ishigaki, et Shin Watanabe. 2013. « Effect of Selective Logging on Stand Structure and Tree Species Diversity in a Subtropical Evergreen Broad-Leaved Forest ». *Annals of Forest Science* 70 (5): 535- 43. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0292-x>.
- Zemunik, Graham, Stuart J. Davies, et Benjamin L. Turner. 2018. « Soil Drivers of Local- scale Tree Growth in a Lowland Tropical Forest ». *Ecology* 99 (12): 2844- 52. <https://doi.org/10.1002/ecy.2532>.

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau référençant les 28 espèces commerciales principales présentes au sein de la concession d'IFO.

| <i>Nom scientifique</i> | <i>Famille</i> | <i>Nom commercial</i> | <i>Abréviation</i> |
|------------------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------|
| <i>Khaya anthotheca</i> | Méliacées | Acajou Blanc | ACA |
| <i>Pouteria aningeri</i> | Sapotacées | Aniégré | ANI |
| <i>Pericopsis elata</i> | Fabacées | Afromosia | AFR |
| <i>Turraeanthus africanus</i> | Méliacées | Avodiré | AVO |
| <i>Triplochiton scleroxylon</i> | Sterculiacées | Ayous | AYO |
| <i>Lophira alata</i> | Ochnacées | Azobé | AZO |
| <i>Nauclea diderrichii</i> | Rubiacées | Bilinga | BIL |
| <i>Guibourtia demeusii</i> | Caesalpiniacées | Bubinga | BUB |
| <i>Leplaea cedrata</i> | Méliacées | Bossé Clair | BSC |
| <i>Lovoa trichilioïdes</i> | Méliacées | Dibétou | DIB |
| <i>Tieghemella africana</i> | Sapotacées | Douka | DOK |
| <i>Azelia bipindensis</i> | Caesalpiniacées | Doussié | DOU |
| <i>Copaïfera mildbraedii</i> | Caesalpiniacées | Etimoé | ETI |
| <i>Eribrroma oblongum</i> | Sterculiacées | Eyong | EYO |
| <i>Milicia excelsa</i> | Moracées | Iroko | IRO |
| <i>Nesogordonia kabingaensis</i> | Sterculiacées | Kotibé | KOB |
| <i>Pterygota macrocarpa</i> | Sterculiacées | Koto 2 | KO2 |
| <i>Entandrophragma candollei</i> | Méliacées | Kosipo | KOS |
| <i>Pterygota bequaertii</i> | Sterculiacées | Koto | KOT |
| <i>Gambeya perpulchra</i> | Sapotacées | Longhi à feuilles rouges | LOR |
| <i>Detarium macrocarpum</i> | Caesalpiniacées | Mambodé | MAM |
| <i>Pterocarpus soyauxii</i> | Fabacées | Padouk Rouge | PAD |
| <i>Bobgunnia fistuloides</i> | Caesalpiniacées | Pau Rosa | PAU |
| <i>Entandrophragma cylindricum</i> | Méliacées | Sapelli | SAP |
| <i>Entandrophragma utile</i> | Méliacées | Sipo | SIP |
| <i>Entandrophragma angolense</i> | Méliacées | Tiama Blanc | TIA |
| <i>Entandrophragma congoense</i> | Méliacées | Tiama Noir | TIN |
| <i>Millettia laurentii</i> | Fabacées | Wengué | WEN |

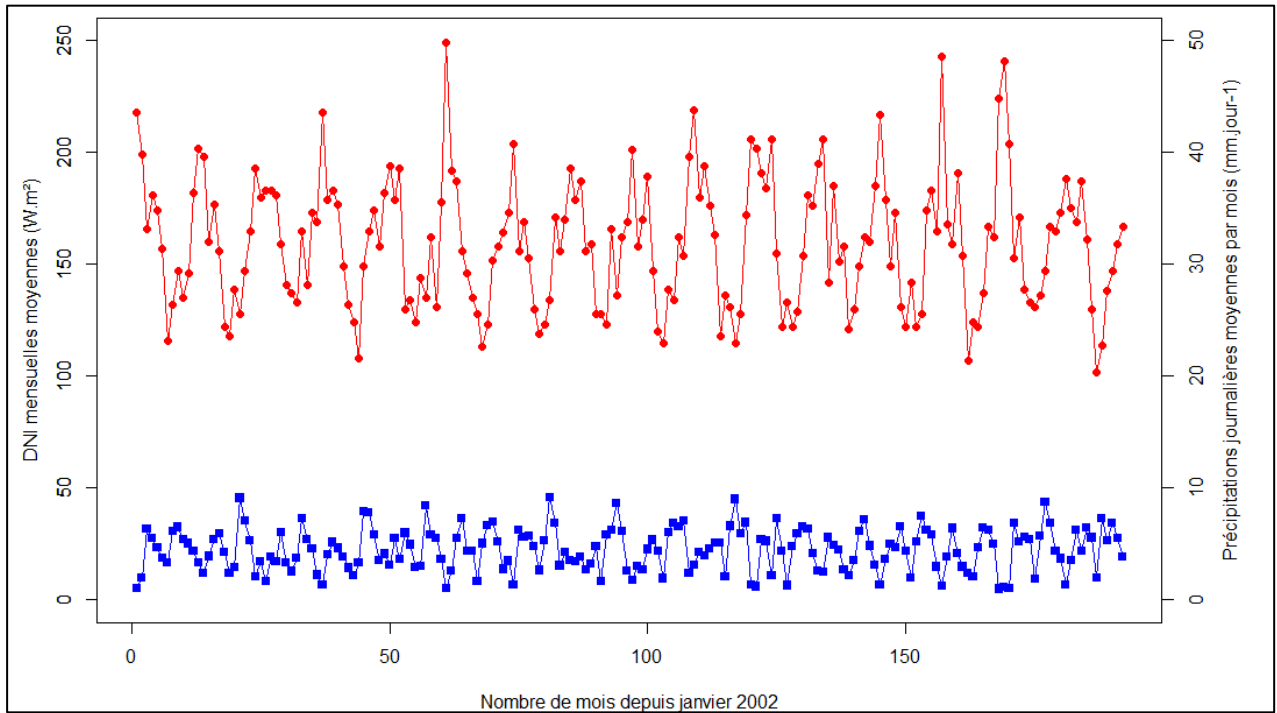
Annexe 2 : Tableau regroupant les variables climatiques calculées par zone et par période d'accroissement.

| <i>Zone</i> | <i>Période d'accroissement</i> | <i>Pluie_an (mm.an⁻¹)</i> | <i>Sec (jours)</i> | <i>Temp_moy (°C)</i> | <i>Ecart_DNI_pluie</i> |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|
| Zone 1 AAC 2005 | Campagne 1-2 | 1661.44 | 11 | 25.35 | 151.6 |
| | Campagne 2-3 | 1659.73 | 24 | 24.85 | 153.3 |
| | Campagne 3-4 | 1642.56 | 30 | 24.71 | 156.7 |
| Zone 2 Forêt Nord-Ouest | Campagne 1-2 | 1675.75 | 24 | 25.24 | 154.2 |
| | Campagne 2-3 | 1727.61 | 13 | 24.52 | 147.4 |
| | Campagne 3-4 | 1635.23 | 30 | 24.75 | 155.6 |
| Zone 3 Forêt claire | Campagne 1-2 | 1731.04 | 12 | 24.94 | 147.7 |
| | Campagne 2-3 | 1716.98 | 20 | 24.76 | 151.4 |
| | Campagne 3-4 | 1620.06 | 30 | 24.73 | 156.2 |
| Zone 4 Afrormosia | Campagne 1-2 | 1626.86 | 18 | 25.16 | 153.2 |
| | Campagne 2-3 | 1621.03 | 24 | 24.88 | 152.0 |
| | Campagne 3-4 | 1653.66 | 30 | 24.69 | 156.3 |

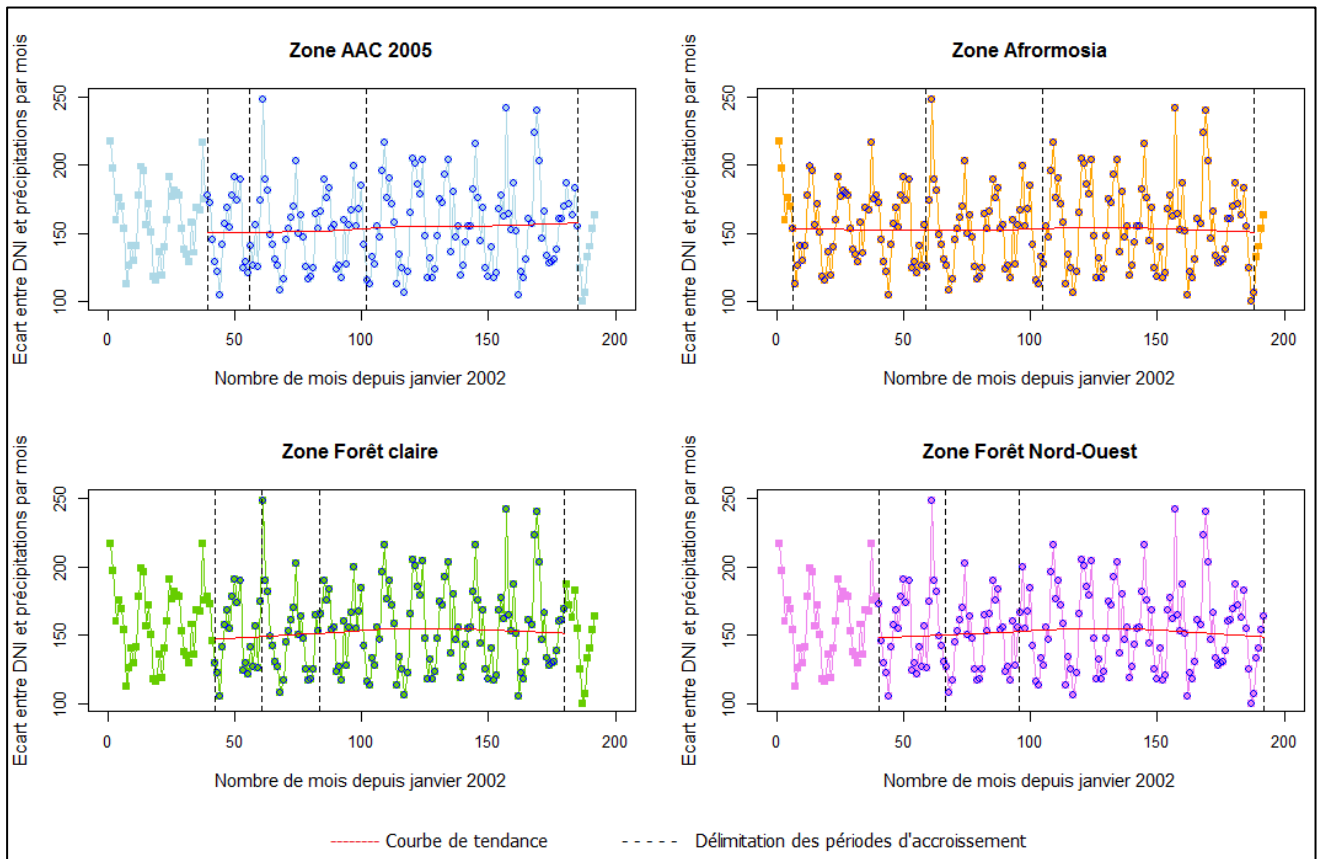
| <i>Zone</i> | <i>Période d'accroissement</i> | <i>Ecart_temp_an (°C)</i> | <i>Ecart_temp_sec (°C)</i> | <i>Ecart_temp_pluie (°C)</i> |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Zone 1 AAC 2005 | Campagne 1-2 | 10.19 | 8.25 | 6.78 |
| | Campagne 2-3 | 8.90 | 8.17 | 5.93 |
| | Campagne 3-4 | 8.25 | 7.30 | 5.57 |
| Zone 2 Forêt Nord-Ouest | Campagne 1-2 | 9.56 | 8.72 | 6.80 |
| | Campagne 2-3 | 8.89 | 8.51 | 5.64 |
| | Campagne 3-4 | 8.22 | 7.17 | 5.34 |
| Zone 3 Forêt claire | Campagne 1-2 | 9.29 | 8.14 | 6.80 |
| | Campagne 2-3 | 9.49 | 9.23 | 5.62 |
| | Campagne 3-4 | 8.38 | 7.23 | 5.58 |
| Zone 4 Afrormosia | Campagne 1-2 | 9.87 | 8.30 | 7.11 |
| | Campagne 2-3 | 8.90 | 8.17 | 5.57 |
| | Campagne 3-4 | 8.25 | 7.30 | 5.61 |

Annexe 3 : Représentation graphique des DNI (Irradiances directes normalisées) mensuelles moyennes ($W.m^2$) et des précipitations journalières moyennes par mois ($mm.jour^{-1}$) (A) ainsi que leur écart par zone d'inventaire et par période d'accroissement (B). La courbe rouge correspond aux DNI mensuelles moyennes. La courbe bleue correspond aux précipitations journalières moyennes par mois.

(A)



(B)



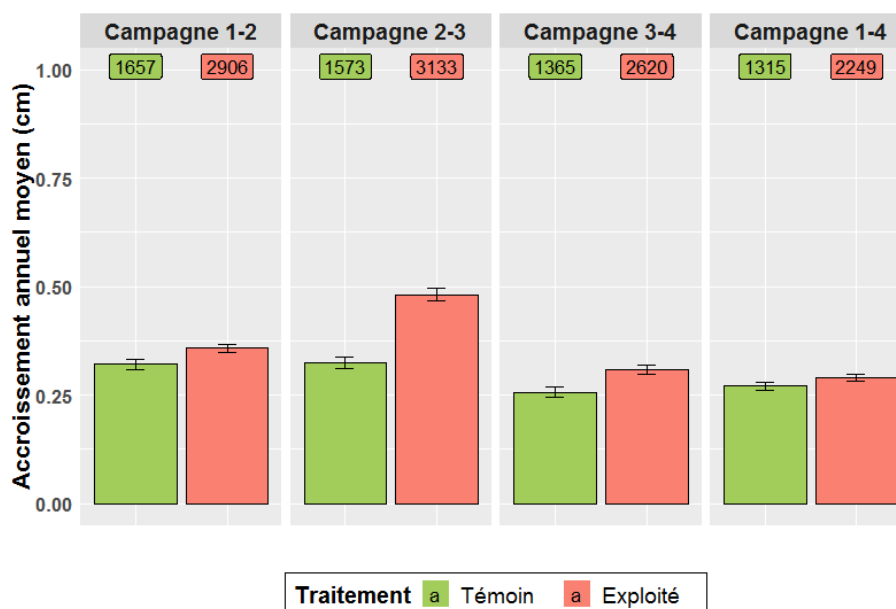
Annexe 4 : Tableau présentant la composition en espèces héliophiles non pionnières (NPLD), pionnières (P) et tolérantes à l'ombrage (SB) des placettes totalement inventoriées à la campagne d'inventaire 1 (témoin). Les placettes 25 et 27 de la zone Afrormosia n'ont pas été prises en compte car elles ont été exploitées avant la campagne 1.

| <i>Zone</i> | <i>Placette</i> | <i>% NPLD</i> | <i>% P</i> | <i>% Total héliophiles</i> | <i>% SB</i> | <i>% Non connu</i> |
|------------------------------------|-----------------|---------------|--------------|----------------------------|--------------|--------------------|
| Zone 1 AAC 2005 | 37 | 15.76 | 7.66 | 23.42 | 69.37 | 7.21 |
| | 45 | 7.69 | 8.55 | 16.24 | 78.20 | 5.56 |
| | 46 | 12.39 | 14.96 | 27.35 | 63.25 | 9.40 |
| | 47 | 11.49 | 5.96 | 17.45 | 76.17 | 6.38 |
| | 55 | 8.81 | 17.10 | 25.91 | 58.03 | 16.06 |
| | 63 | 11.05 | 12.63 | 23.68 | 72.63 | 3.69 |
| | <i>Moyenne</i> | 11.20 | 11.14 | 22.34 | 69.61 | 8.05 |
| Zone 2 Forêt Nord-Ouest | 64 | 14.91 | 3.44 | 18.35 | 78.21 | 3.44 |
| | 72 | 19.58 | 4.43 | 24.01 | 70.40 | 5.59 |
| | <i>Moyenne</i> | 17.25 | 3.94 | 21.18 | 74.31 | 4.52 |
| Zone 3 Forêt claire | 28 | 0.00 | 44.44 | 44.44 | 40.74 | 14.82 |
| | 36 | 22.22 | 22.22 | 44.44 | 37.04 | 18.52 |
| | <i>Moyenne</i> | 11.11 | 33.33 | 44.44 | 38.89 | 16.67 |
| Zone 4 Afrormosia | 3 | 16.10 | 3.46 | 19.56 | 71.78 | 8.66 |
| | 12 | 15.40 | 4.91 | 20.31 | 72.10 | 7.59 |
| | 13 | 23.30 | 7.33 | 30.63 | 55.50 | 13.87 |
| | 15 | 10.08 | 2.17 | 12.25 | 65.41 | 22.34 |
| | 24 | 13.05 | 7.63 | 20.68 | 65.52 | 13.80 |
| | <i>Moyenne</i> | 15.59 | 5.10 | 20.69 | 66.06 | 13.25 |

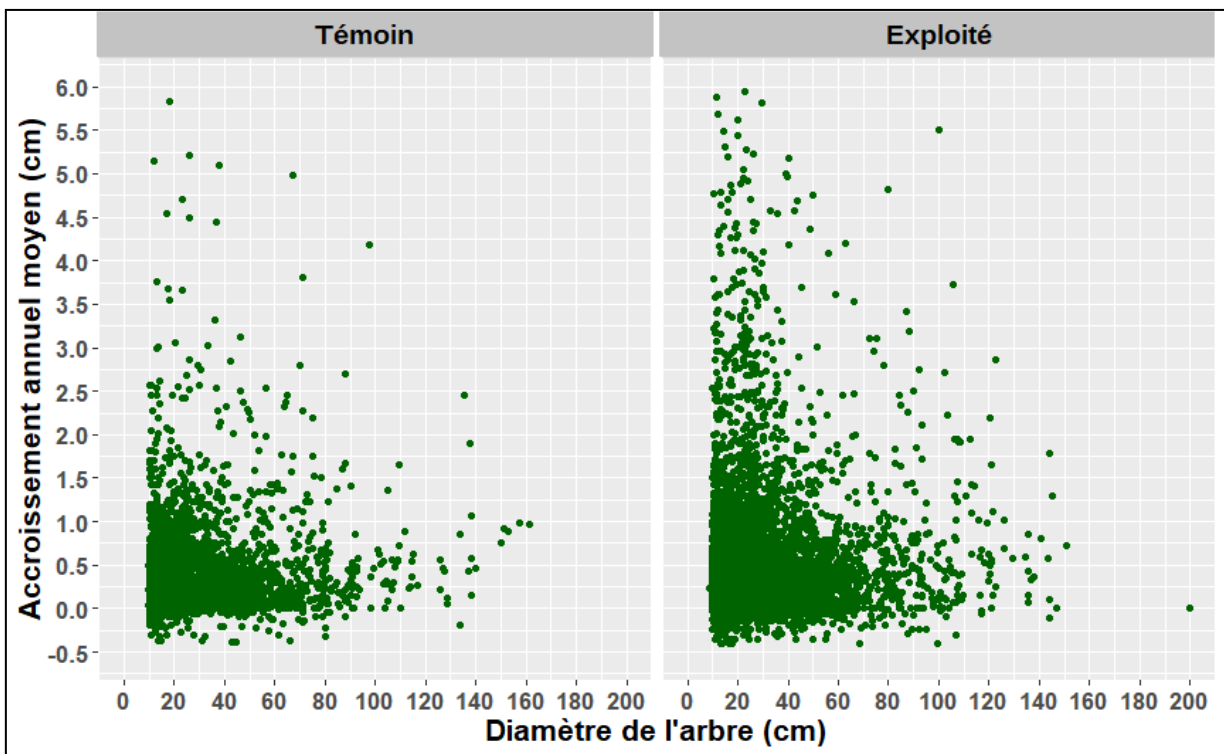
Annexe 5 : Tableau présentant la composition en espèces commerciales héliophiles non pionnières (NPLD), pionnières (P) et tolérantes à l'ombrage (SB) de toutes les placettes à la campagne d'inventaire 1 (témoin).

| Zone | % NPLD | % P | % Total héliophiles | % SB | % Non connu |
|----------------------------|--------|-------|---------------------|-------|-------------|
| Zone 1 AAC 2005 | 70.24 | 14.48 | 84.72 | 15.01 | 0.27 |
| Zone 2 Foret Nord-Ouest | 85.53 | 5.26 | 90.79 | 9.21 | 0.00 |
| Zone 3 Foret claire | 62.50 | 6.25 | 68.75 | 31.25 | 0.00 |
| Zone 4 Afromosia | 61.13 | 18.56 | 79.69 | 14.85 | 5.46 |

Annexe 6 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) du peuplement, toutes zones confondues, en fonction de la période d'accroissement et du traitement. Les effectifs qui ont servi à chaque calcul d'accroissement annuel moyen sont indiqués.



Annexe 7 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) des arbres du peuplement en fonction de leur diamètre initial et du traitement.



Annexe 8 : Synthèse des paramètres des modèles reliant le logarithme de l'accroissement diamétrique annuel moyen de 5569 arbres issus de peuplements complets à plusieurs variables explicatives : le diamètre (LogDiam), la Zone, l'intensité d'exploitation (Intens), le temps écoulé depuis l'exploitation (Tps_expl) et une variable climatique (Pluie_an, Sec, Ecart_DNI_pluie, Temp_moy, Ecart_temp_an, Ecart_temp_pluie). Les variances associées au facteur aléatoire Ind, au facteur aléatoire Sp et à l'erreur résiduelle sont également présentées. "--" : absence de la variable dans le modèle concerné. Significativité statistique aux risques : 0,05 : "**", 0,01 : "***", 0,001 : "****", non significatif : "ns".

| <i>Variables explicatives</i> | | <i>M1</i> | <i>M2</i> | <i>M3</i> | <i>M4</i> | <i>M5</i> |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | | AIC = 359 | AIC = 346 | AIC = 357 | AIC = 345 | AIC = 357 |
| <i>Effets fixes</i> | Intercept | 0.6644 *** | 0.5215 *** | 0.4922 *** | 0.9537 *** | ns |
| | LogDiam | -0.0304 * | -0.0294 * | -0.0296 * | -0.0300 * | -0.0302 * |
| | Zone Afrormosia | -0.2226 *** | -0.2173 *** | -0.2180 *** | -0.2211 *** | -0.2202 *** |
| | Zone Forêt Nord-Ouest | -0.2279 *** | -0.2361 *** | -0.2413 *** | -0.2402 *** | -0.2428 *** |
| | Intens | ns | ns | ns | ns | ns |
| | Tps_expl | -0.0025 *** | -0.0018 *** | ns | -0.0021 *** | ns |
| | Pluie_an | ns | -- | -- | -- | -- |
| | Sec | -- | -0.0012 **** | ns | -- | -- |
| | Ecart_DNI_pluie | -- | -- | -- | -0.0029 ** | ns |
| | LogDiam : Zone Afrormosia | 0.0341 * | 0.0339 * | 0.0338 * | 0.0342 * | 0.0339 * |
| | LogDiam : Zone Forêt Nord-Ouest | ns | ns | ns | ns | ns |
| | LogDiam : Intens | 0.0062 * | 0.0061 * | 0.0062 * | 0.0061 * | 0.0062 * |
| | Intens : Tps_expl | -0.0025 *** | -0.0023 *** | -0.0025 *** | -0.0023 *** | -0.0026 *** |
| | Tps_expl : Sec | -- | -- | -0.00009 ** | -- | -- |
| Tps_expl : Ecart_DNI_pluie | -- | -- | -- | -- | -0.0003 * | |
| <i>Effets aléatoires</i> | Ind (Intercept) | 0.0254 *** | 0.0253 *** | 0.0254 *** | 0.0254 *** | 0.0254 *** |
| | Sp (Intercept) | 0.0719 *** | 0.0724 *** | 0.0719 *** | 0.0721 *** | 0.0718 *** |
| | LogDiam | 0.0066 *** | 0.0066 *** | 0.0066 *** | 0.0067 *** | 0.0066 *** |
| | Erreur résiduelle | 0.0393 | 0.0392 | 0.0392 | 0.0392 | 0.0392 |

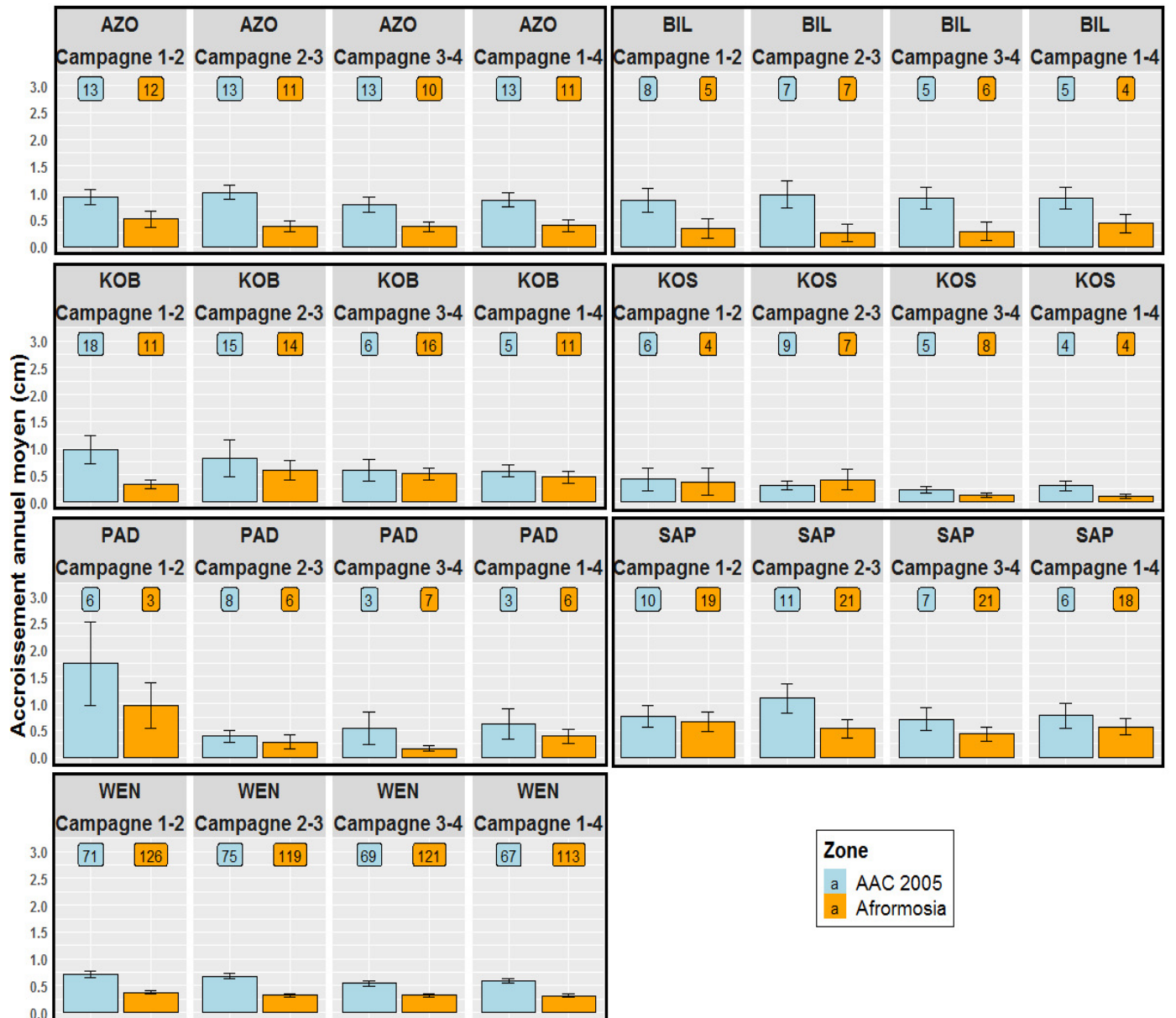
| <i>Variables explicatives</i> | | <i>M6</i> | <i>M7</i> | <i>M8</i> | <i>M9</i> | <i>M10</i> | <i>M11</i> |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | AIC = 337 | AIC = 343 | AIC = 327 | AIC = 328 | AIC = 337 | AIC = 349 |
| <i>Effets fixes</i> | Intercept | ns | ns | 0.3211 *** | 0.4478 *** | 0.4128 *** | 0.4485 *** |
| | LogDiam | -0.0292 * | -0.0294 * | -0.0286 * | -0.0285 * | -0.0294 * | -0.0293 * |
| | Zone Afrormosia | -0.2178 *** | -0.2177 *** | -0.2198 *** | -0.2180 *** | -0.2217 *** | -0.2202 *** |
| | Zone Forêt Nord-Ouest | -0.2348 *** | -0.2370 *** | -0.2408 *** | -0.2476 *** | -0.2388 *** | -0.2420 *** |
| | Intens | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| | Tps_expl | -0.0018 *** | -0.0639 ** | -0.0013 ** | -0.0123 *** | -0.0018 *** | -0.0054 ** |
| | Temp_moy | 0.0340 *** | ns | -- | -- | -- | -- |
| | Ecart_temp_an | -- | -- | 0.0181 *** | ns | -- | -- |
| | Ecart_temp_pluie | -- | -- | -- | -- | 0.0133 *** | ns |
| | LogDiam : Zone Afrormosia | 0.0339 * | 0.0337 * | 0.0344 * | 0.0340 * | 0.0344 * | 0.0342 * |
| | LogDiam : Zone Forêt Nord-Ouest | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| | LogDiam : Intens | 0.0061 * | 0.0062 * | 0.0059 * | 0.0060 * | 0.0061 * | 0.0061 * |
| | Intens : Tps_expl | -0.0023 *** | -0.0025 *** | -0.0021 *** | -0.0024 *** | -0.0023 *** | -0.0024 *** |
| | Tps_expl : Temp_moy | -- | 0.0025 ** | -- | -- | -- | -- |
| | Tps_expl : Ecart_temp_an | -- | -- | -- | 0.0012 *** | -- | -- |
| Tps_expl : Ecart_temp_pluie | -- | -- | -- | -- | -- | 0.0006 * | |
| <i>Effets aléatoires</i> | Ind (Intercept) | 0.0253 *** | 0.0253 *** | 0.0253 *** | 0.0254 *** | 0.0253 *** | 0.0253 *** |
| | Sp (Intercept) | 0.0723 *** | 0.0718 *** | 0.0726 *** | 0.0720 *** | 0.0724 *** | 0.0722 *** |
| | LogDiam | 0.0066 *** | 0.0066 *** | 0.0066 *** | 0.0066 *** | 0.0066 *** | 0.0066 *** |
| | Erreur résiduelle | 0.0392 | 0.0392 | 0.0392 | 0.0391 | 0.0392 | 0.0392 |

Annexe 9 : Représentation graphique de l'accroissement annuel moyen (cm) des espèces commerciales principales de chaque zone témoin (A) ou exploitée (B) en fonction de la période d'accroissement. Les effectifs qui ont servi à chaque calcul d'accroissement annuel moyen sont indiqués. Seules les espèces commerciales les mieux représentées en termes d'effectifs et présentes dans plusieurs zones ont été analysées. Une espèce commerciale ne comptant qu'un individu dans une zone ne sera pas prise en compte pour cette dernière mais le sera pour les autres zones si les effectifs le permettent.

(A)



(B)



Annexe 10 : Synthèse des paramètres des modèles reliant le logarithme de l'accroissement diamétrique annuel moyen de 371 *Millettia laurentii* (WEN) issus de peuplements complets à plusieurs variables explicatives : le diamètre (LogDiam), la zone et une variable climatique (Pluie_an, Sec, Ecart_DNI_pluie, Ecart_temp_an, Ecart_temp_sec, Ecart_temp_pluie). Les variances associées au facteur aléatoire Ind et à l'erreur résiduelle sont également présentées. "--" : absence de la variable dans le modèle concerné. Significativité statistique aux risques : 0,05 : "*", 0,01 : "", 0,001 : "***", non significatif : "ns".**

| <i>Variables explicatives</i> | | <i>M1</i> | <i>M2</i> | <i>M3</i> | <i>M4</i> | <i>M5</i> | <i>M6</i> |
|-------------------------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | AIC = -222 | AIC = -233 | AIC = -239 | AIC = -245 | AIC = -247 | AIC = -249 |
| <i>Effets fixes</i> | Intercept | ns | 1.6816 *** | 0.7499 *** | 0.3406 * | 0.4820 *** | 0.3906 *** |
| | LogDiam | -0.0810 ** | -0.0735 ** | -0.0691 * | -0.0707 ** | -0.0722 ** | -0.0678 * |
| | Zone Afromrosia | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| | Zone Forêt Nord-Ouest | -1.187 *** | -1.1638 *** | -1.142 *** | -1.1907 *** | -1.1760 *** | -1.1517 *** |
| | Pluie_an | ns | -- | -- | -- | -- | -- |
| | Ecart_DNI_pluie | -- | -0.0063 ** | -- | -- | -- | -- |
| | Sec | -- | -- | -0.0029 *** | -- | -- | -- |
| | Ecart_temp_sec | -- | -- | -- | 0.0444 *** | -- | -- |
| | Ecart_temp_pluie | -- | -- | -- | -- | 0.0353 *** | -- |
| | Ecart_temp_an | -- | -- | -- | -- | -- | 0.0319 *** |
| | LogDiam : Zone Afromrosia | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| | LogDiam : Zone Forêt Nord-Ouest | 0.3363 *** | 0.3279 *** | 0.3249 *** | 0.3351 *** | 0.3353 *** | 0.3289 *** |
| <i>Effets aléatoires</i> | Ind (Intercept) | 0.0371 *** | 0.0373 *** | 0.0376 *** | 0.0374 *** | 0.0376 *** | 0.0376 *** |
| | Erreur résiduelle | 0.0241 | 0.0238 | 0.0234 | 0.0234 | 0.0233 | 0.0232 |

Résumé :

Un plan d'aménagement qui se veut « durable » doit reposer sur de bonnes connaissances de la dynamique forestière. Il est donc essentiel de mettre en place des parcelles de suivi permanents de cette dynamique. Depuis 2002, en République du Congo, IFO fait partie de ces rares compagnies forestières ayant mis en place des dispositifs permanents dans différentes zones, sujettes à l'exploitation ou non. L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de distinguer les effets de l'environnement et de l'exploitation sur la croissance des peuplements et des espèces commerciales. Au niveau des peuplements, les différences de sol, de structure et de composition floristique induisent des dynamiques de croissance différentes. Plus la densité initiale des peuplements et le diamètre individuel des arbres sont élevés, plus leur effet sur la croissance est négatif. L'accroissement dépend également du climat, notamment de l'effet positif des températures croissantes. Après exploitation, la croissance augmente en fonction de son intensité. L'effet de l'exploitation dépend aussi de son interaction avec l'environnement. Pour la majorité des espèces commerciales, la quantification de ces effets environnementaux et anthropiques n'a pas été possible du fait du manque de données. Sans compréhension de l'influence de ces facteurs sur les espèces, les pratiques actuelles, même sous aménagement, risquent de conduire à une dégradation des peuplements forestiers. Il est donc nécessaire d'obtenir davantage de données d'inventaire, dans différents sites, afin d'améliorer les règles de l'exploitation forestière.

Mots clés : *dynamique de croissance, exploitation forestière, climat, sol, densité d'arbres, structure diamétrique, composition floristique*

Abstract :

A "sustainable" management plan must be based on good knowledge of forest dynamics. It is therefore essential to put in place permanent monitoring plots for this dynamic. Since 2002, in the Republic of Congo, IFO is one of those rare forest companies that have established permanent systems in different areas, subject to exploitation or not. The main objective of this work is to study and distinguish the effects of environment and exploitation on the growth of stands and commercial species. At the stand level, differences in soil, structure and floristic composition induce different growth dynamics. The higher the initial density of stands and the individual tree diameter, the more negative their effect on growth. The increase also depends on the climate, including the positive effect of increasing temperatures. After exploitation, growth increases according to its intensity. The effect of exploitation also depends on its interaction with the environment. For the majority of commercial species, quantification of these environmental and anthropogenic effects was not possible due to lack of data. Without understanding the influence of these factors on species, current practices, even under management, may lead to forest stand degradation. It is therefore necessary to obtain more inventory data, at different sites, to improve logging rules.

Keywords : *growth dynamic, logging, climate, soil, tree density, diametric structure, floristic composition*