Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo
Volume 12. P. 22-34, Avril (2019)
Print ISSN : 2409-1693 / Online ISSN : 2412-3005

Relation précipitations et croissances des arbres tropicaux dans les forêts semi- décidues de la région de Kisangani en RD Congo: Cas de *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg et *Pericopsis elata* (Harms) Meuwen

Ilunga C.[1], Mbayu F.[1], Boyemba F.[2,3], Sabongo P.[2], Nshimba H.[2] et Ndjele L.[2]

(1) Département de Eaux et Forêts, Faculté de Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables, Université de Kisangani, République Démocratique du Congo / e-mail : ilungawak@gmail.com
(2) Département d'Ecologie et Gestion des Ressources Végétales, Faculté des Sciences, Université de Kisangani, République Démocratique du Congo
(3) Laboratoire d'Ecologie et Aménagement Forestièr (LECAFOR), Faculté des Sciences, Université de Kisangani, République Démocratique du Congo

DOI : http://doi.org/10.5281/zenodo.2610524

Résumé

De par sa capacité à fournir les variations de croissance diamétrique sur toute la durée de la vie de l'arbre, la dendrochronologie est reconnue comme un outil important et efficace pour évaluer le lien possible entre la croissance et le climat. Dans cette étude, la croissance de deux espèces d'arbres tropicaux, Milicia excelsa (Welw.) C.C. Berg et Pericopsis elata (Harms) Meeuwen, a été analysée en réponse aux variations mensuelles de précipitations. La préparation des échantillons de bois ainsi que les mesures de cernes ont été effectuées suivant une approche particulière basée sur l'utilisation des outils SIG (Système d'Information Géographique). Pour chacune des espèces ciblées, une chronologie de croissance a été construite pour le site sur base de la datation de séries individuelles d'arbres récoltés. La comparaison de séries temporelles de croissance avec les précipitations a révélé que les croissances annuelles des arbres sont positivement liées aux variations des précipitations, mais à de périodes différentes au cours de l'année : première période de pluies (avril à mai) corrélée à la croissance de M. excelsa et la seconde période de pluies (septembre à octobre) à celle de P. elata. Dans le contexte actuel d'aménagement durable des forêts, il serait très indiqué de réaliser les études de ce genre sur d'autres espèces pour mieux comprendre la réponse des écosystèmes forestiers aux possibles modifications climatiques.

Mots clés *: Milicia excelsa, Pericopsis elata, dendrochronologie, Système d'Information Géographique (SIG), Forêts tropicales semi-décidues*

Abstract

Due to its ability to provide rapid growth variations over the life of the tree, Dendrochronology is recognized as an important and effective tool to assess the link between growth and climate. In this study, response of two tropical species from tropical forest, Milicia excelsa (Welw.) C.C. Berg and Pericopsis elata (Harms) Meeuwen, to rainfall variations was analyzed. Wood sample preparation as well as ring measurement were carried out following a particular approach based on the use of GIS tools (Geographic Information System). The species-site chronology was constructed from the cross-dated individual growth-ring series. The comparison of this chronology with time-series of local precipitations revealed that annual growth-ring is positively related to prepicitation during the rainy season but at different months: precipitation during the early rainy season (april to may) associated to the growing for M. excelsa and precipitations at the end of the rainy season (september to october) for P. elata. In the current context of sustainable forests management, it would be highly recommended to develop such studies on other species in order to better understand the response of forest ecosystems to possible climate change.

Keywords *: Milicia excelsa, Pericopis elata, dendrochronology, Geographic Information System (GIS), Semi-deciduous tropical forest*

1. Introduction

En Afrique Centrale, l'un des grands défis scientifiques est tout d'abord de fournir les informations précises relatives à la croissance des espèces sur une période assez longue qui puisse permettre de les analyser avec les séries climatiques. En effet, la plupart des

données d'accroissement actuellement utilisées au sein des administrations forestières en Afrique Centrale sont issues des mesures répétées des arbres dans des dispositifs permanents sur des périodes de moins de 30 ans (Picard et Gourlet-fleury, 2008). Les essais d'analyses de relation « croissance-climat » à partir des données de dispositif permanent ou même des modèles statistiques ont fourni peu de résultats utiles et significatifs en raison du manque de données annuelles sur une période aussi longue que les données climatiques (Couralet et al., 2010).

La dendrochronologie est aujourd'hui présentée comme une alternative efficiente aux méthodes classiques de mesure de suivi de la croissance des arbres. L'un des principaux avantages de la dendrochronologie est la capacité de fournir de manière rapide le taux de croissance et leurs variations sur toute la durée de la vie de l'arbre (Mariaux, 1967; Catinot, 1970 ; Worbes, 1995; Détienne et Mariaux, 1997; Détienne et al., 1998). Les potentialités de cette discipline ont été largement utilisées en zones tempérées et boréales et ont conduit à des applications dans divers domaines tels que la climatologie, la géologie, l'écologie, l'anthropologie. (Lebourgeois, 2010). Par contre, en régions tropicales, l'évolution de la dendrochronologie a cependant été lente notamment suite à une opinion très répandue affirmant qu'il n'y avait pas de variabilité saisonnière, capables d'imprimer dans le bois des cernes dénombrables (Catinot, 1970 ; Détienne et al., 1998; Hayden, 2008). Les premiers résultats de recherche de Catinot (1970) ont particulièrement contribué à poser les bases d'analyses de cernes sur les arbres de la forêt tropicale africaine. Ces dernières décennies, la plupart d'études ont beaucoup plus insisté sur l'intérêt de la dendrochronologie à améliorer les connaissances de croissance diamétrale des arbres tropicaux, la productivité annuelle de la biomasse ainsi que les analyses de relation cerne-climat (dendroclimatologie) (Brienen et Zuidema, 2005; Trouet et al., 2006; Schongart et al., 2006; Couralet et al., 2010; De Rider et al., 2010 ; Worbes et Raschke, 2012; Mbow et al., 2013; De Ridder et al., 2013; Groenendijk et al., 2014; De Ridder et al., 2014). Vu la diversité des écosystèmes tropicaux, les défis sont encore énormes et le potentiel dendrochronologique de la majorité d'essences reste à déterminer (Worbes, 2002).

Face aux problèmes actuels des changements climatiques aggravés par la déforestation, l'application de la dendroclimatologie est pressentie comme une voie de réponse aux préoccupations majeures liées à l'état et à la dynamique des écosystèmes tropicaux du Bassin du Congo. Il est question de connaitre comment les différents types de forêts se développent sous les contraintes de paramètres climatiques (température, précipitations, humidité, etc.) et éventuellement d'affiner ainsi les connaissances sur l'autoécologie des espèces. Dans le cadre du processus REDD (Reduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation), en particulier dans le processus de suivi de stockage de carbone, la connaissance de la dynamique forestière fournirait des informations essentielles à la prise de décisions (Mayaux et al., 2013). L'analyse de la réponse des forêts au climat et à ses variations dans le temps et dans l'espace s'avère en outre utile en raison de la nécessité croissante de prévoir les conséquences des changements climatiques.

Le présent travail analyse la relation entre la croissance des arbres tropicaux et les variations climatiques (les précipitations en particulier) dans les forêts tropicales semi-décidues du Nord-Est de la République Démocratique du Congo (RDC). Ces analyses ont essentiellement porté sur les cernes de deux espèces tropicales : *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg (Iroko) et *Pericopsis elata* (Harms) Van Meeuwen (Afrormosia). L'objectif de cette étude est de décrire la dynamique de la croissance à travers une chronologie des séries des largeurs de cernes et de connaitre comment les rythmes de croissance de ces espèces réagissent-ils face aux variations de précipitations. Deux principales questions de recherche sont abordées dans cette étude, à savoir: les variations de précipitions influent de la même manière sur les rythmes de croissance saisonnière des espèces héliophiles? La synchronisation de séries temporelles de cerne et celles de précipitations confirme-t-elle les caractères annuels de cernes de ces espèces ?

2. Matériel et Méthodes

2.1. Espèces en étude

M. excelsa (Welw.) C.C. Berg (Moraceae) et *P. elata* (Harms) Meeuwen (Fabaceae/Caesalpinioïdeae) sont comptés parmi les essences commerciales de forêts africaines, appréciées pour la qualité de leurs bois. Les questions d'écologie de ces espèces ont été largement abordées en Afrique Occidentale et Centrale. Les deux espèces ont été presque partout décrites comme des espèces héliophiles, nécessitant

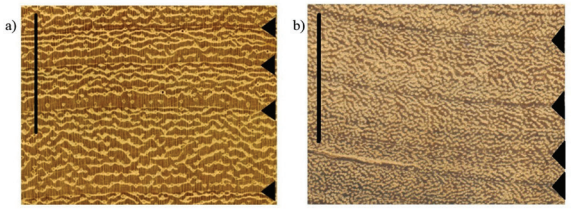

Figure 1 : Illustration de limites de cernes sur l'image de la section transversale de la rondelle : a) Milicia excelsa (2500 dpi, barre d'échelle= 5 mm) et b) Pericopis elata (1600 dpi, barre d'échelle=5 mm). Les flèches indiquent les limites de cernes

un ensoleillement dans une certaine mesure pour leur croissance, à différents stades de développement. L'espèce *M. excelsa* (Iroko) est largement distribuée dans l'ensemble des forêts tropicales d'Afrique Occidentale, Centrale, Australe (Bizoux et al., 2009; Ouinsavi et Sokpon, 2010; Daïnou et al., 2012; Onefeli et Agwu, 2015 ; Fayolle et al., 2015). Par contre, *P. elata* (Assamela/Afrormosia) est une espèce grégaire avec une aire de distribution limitée aux forêts denses humides semi-caducifoliées s'étendant de la Côte d'Ivoire à la RD Congo (Boyemba, 2011; Bourlands et al., 2012). A cause de la surexploitation dans certains pays, *M. excelsa* et *P. elata* figurent à ce jour parmi les espèces menacées d'extinction (liste rouge des essences ligneuses de l'UICN et/ou CITES) (Abensperg-Traun, 2009). Si l'importance économique de bois de ces deux espèces a retenu l'attention scientifique de plusieurs chercheurs, les données décrivant la nature et la périodicité de cernes n'ont fait l'objet que de quelques rares études en Afrique et/ou dans le Bassin du Congo (Détienne, 1976 ; Normand et Paquis, 1976 ; De Ridder et al., 2014). Plus récemment, quelques travaux réalisés en préparation de la présente étude ont tenté d'apporter quelques contributions sur la description des cernes de ces deux espèces en étude, tel qu'illustré sur la figure 1 (Ilunga et al., 2017a; 2017b).

2.2. Site d'échantillonnage

La collecte des échantillons a été réalisée, entre juin et décembre 2014, au sein de la concession 046/11 de la Compagnie Forestière et de Transformation (CFT) située au Sud de la ville de la Kisangani, entre les latitudes 0°30' Nord et 0°10' Sud et les longitudes 25°00' Ouest et 25°35' Est (figure 2b). Cette concession comprend un massif forestier recelant une grande diversité de formations végétales, parmi lesquelles on peut citer les forêts à *Gilbertiodendron dewevrei* (De Wild.) J. Léonard (Limbali), les forêts à forte abondance de *Brachystegia laurentii*

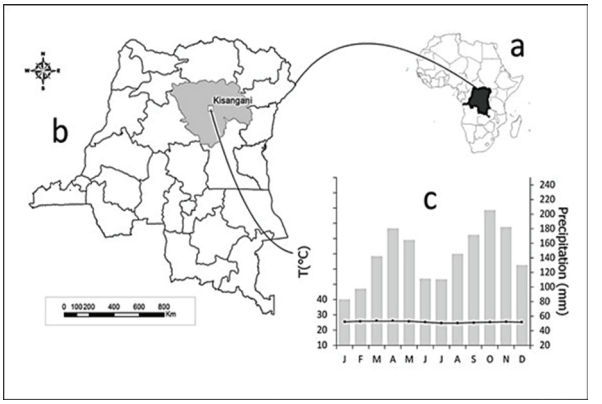

Figure 2 : Localisation du site d'étude en Afrique (a) et en RDC (b). Le diagramme climatique (c) a été construit à partir des données météorologiques de l'aéroport de Kisangani pour la période de 1976-2005 *(Source : Kahindo. 2011).*

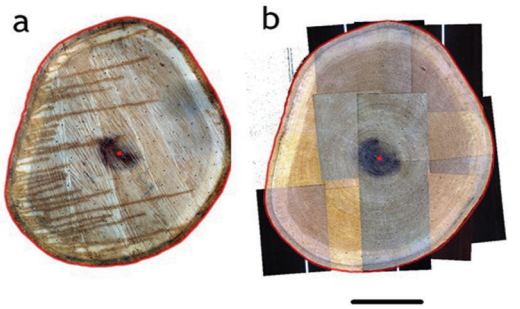

Figure 3: Principales phases de préparation des échantillons de bois illustrée sur une rondelle de M. excelsa : (a) Ortho-image de la rondelle fraiche construite à partir des photos avec les points de calage (trous) ; (b) Mosaïque des scans issue du géoréférencement des scans sur l'ortho-image (échelle :400 mm).

(De Wild.) Louis ex Hoyle (Bomanga) et de jeunes formations caractérisées par des essences telles que *Khaya anthotheca* (Welw.) C. D (Acajou d'Afrique), *Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague (Sapeli), *Pericopsis elata* (Afrormosia/Assamela) ou *Milicia excelsa* (Iroko) (FRM, 2008). Le relief de la zone d'étude est relativement plat et correspond à la morphologie générale du Bassin versant du fleuve Congo, dominé par un réseau hydrographique très diffus qui donne naissance à de nombreux terrains hydromorphes. De par sa position géographique, la concession 46/11 se situe dans une zone dominée par un climat de type Af de Koppen, où il pleut pratiquement tous les mois de l'année (±1 700 mm par an). Une très légère baisse des précipitations est cependant observée en deux périodes sèches (entre janvier-février, puis juin-juillet), mais il n'existe pas de saison sèche proprement dite si l'on se réfère au

Tableau 1 : Principaux paramètres statistiques calculés sur les séries temporelles

Paramètre statistique	Définition	Réf. (*)
Largeur moyenne de cernes (LC)	Somme de toutes les épaisseurs de cernes d'une chronologie divisée par le nombre total de cernes. Classiquement, on associe à cette valeur moyenne les mesures de dispersion : Ecart-type (ET) et le coefficient de variation (CV).	(1)
Sensitivité moyenne (MSb)	Calculé selon l'équation de Biondi et de Qeadan (2008), ce paramètre donne le pourcentage moyen de variation de largeur entre deux cernes consécutifs. Elle exprime l'ampleur des changements affectant à court-terme la largeur de cernes et sa valeur oscille entre 0, pour deux cernes successifs égaux, à 2 lorsque l'épaisseur de l'un d'entre eux est nulle.	(1), (2), (3)
Autocorrélation d'ordre 1 (Ar)	Elle correspond à un coefficient de corrélation de la régression linéaire simple entre la série de largeur de cerne d'un arbre donné et cette même série décalée d'une année. Le coefficient Ar estime donc l'interdépendance entre deux séries successives de la même série chronologie, c'est-à-dire l'effet de la persistance liée aux conditions conduisant à l'élaboration du cerne de l'année (t-1) sur la mise en place du cerne de l'année suivante (t).	(1), (3)
Expressed population signal (EPS)	EPS quantifie la force relative du signal commun (ri) par rapport au signal total (signal commun et bruit). Ce ratio oscille entre la valeur de ri et 1, où valeur 1 traduit un bruit nul et une estimation « parfaite » du signal commun à tous les arbres de la population échantillonnée. Bref, La valeur d'EPS est d'autant plus élevée que le signal contenu dans les séries d'indices de croissance est homogène	(1), (4)

(*) : les références mentionnés dans le tableau correspondent respectivement à (1) Lebourgeois et Merian, 2012 ; (2) Biondi et Qeadan (2008) ; (3) Mérian, 2013 et (4) Wigley et al.(1984).

diagramme climatique de la région (Boyemba, 2011 ; Kahindo, 2011 ; Mbayu, 2017) (voir figure 2c). Selon les données climatiques de la ville de Kisangani (Kahindo, 2011), la température moyenne annuelle oscille autour de 25°C, avec de faibles amplitudes.

2.3. Préparation des échantillons de bois et mesures de cernes

Au total 16 rondelles, dont 11 pour *M. excelsa* et 5 pour *P. elata*, ont été prélevées sur des arbres abattus au sein des blocs sous exploitation en 2014. Les échantillons collectés ont été préparés suivant l'approche d'analyses de cernes qui combine les principes de photographie, les outils SIG et les images haute-résolution issues du scannage de la section transversale des disques (Latte et al., 2015). La première étape de la préparation a consisté à prendre des photos de la surface des disques de tige avec un appareil photo. Ces photos ont ensuite été assemblées, à l'aide du logiciel Photoscan v1.0 (Agisoft, Carshalton, UK), pour générer l'ortho-image de la rondelle fraîche (figure 3a). Puis, les disques ont été séchés à l'air libre (pendant 72 heures, température de l'air ambiant autour de 25°C) et poncés en utilisant de papiers abrasifs de différents grains. Les sections transversales de disques poncés ont été scannées à une résolution moyenne de 1600 dpi. Le géoréférencement des scans sur l'ortho-image a permis de produire une mosaïque d'images (figure 3b) correspondant à la section transversale entière du disque poncé. Suivant ces différentes phases de préparation, les dimensions réelles de la rondelle fraîche sont ainsi intégrées sur la mosaïque des scans où la visibilité des cernes est particulièrement améliorée.

Sur la mosaïque de scans (figure 3b), les limites de cernes ont été matérialisées par des points (un point par cerne) à l'aide des outils d'édition disponibles dans ArcMap. Pour chaque disque, trois à quatre rayons ont été pris en compte pour le calcul des largeurs des cernes. Le long des rayons considérés, le calcul des largeurs des cernes a été réalisé automatiquement de la moelle à l'écorce, en suivant une direction perpendiculaire aux cernes, sous l'interface de ArcMap (cf. fonction «point distance» dans ArcToolbox, Esri ArcGis 10.3) (Ilunga et al., 2017a ; Ilunga et al., 2017b). Ces mesures ont été effectuées avec une précision d'ordre supérieure au centième de millimètre (soit 1/100000 mm). Toutes les séries des largeurs des cernes obtenues ont été stockées sous forme de tables dans des géodatabases.

Une fois les séries de largeurs de cernes produites, il a été question d'attribuer à chaque cerne, son année de formation connaissant l'année d'abattage (ici, 2014) de l'arbre. Cette opération, appelée « interdatation »,

n'a pas été aisée à cause de problèmes d'anomalies des cernes. On note les cas des cernes nuls (wedging rings) ou encore des cernes manquants (Ilunga et al., 2017a ; De Ridder et al., 2014). Dans la plupart de cas, les cernes nuls ont particulièrement engendré un décalage de séries élémentaires issues d'un même arbre. Un contrôle visuel était obligatoirement nécessaire pour corriger les différences des cernes entre séries et ce pour aboutir à un calage parfait des séries de croissance dans le temps. L'inspection visuelle de données a été rendue possible en plaçant les séries élémentaires sous de graphiques présentant les largeurs de cernes en logarithme en fonction du temps. Par la suite, les séries élémentaires ont été moyennées afin d'obtenir la série individuelle caractérisant l'arbre échantillonné. Il convient de signaler que lorsque les différences entre les séries élémentaires étaient trop importantes pour être moyennées, la série la plus longue était considérée comme représentative de l'arbre échantillonné. En perspective d'analyses climatiques, les séries individuelles de largeur de cernes ont été standardisées pour produire des séries d'indices de croissance où seul le signal climatique est conservé (Fritts et Dean, 1992 ; Lebourgeois and Merian, 2012). Cette standardisation a été effectuée suivant l'approche de division (Cook et Peters, 1981). Finalement, deux courbes moyennes de chronologie ont été construites en considérant respectivement les séries individuelles brutes et celles standardisées. Quelques statistiques dendrochronologiques de base qui ont été calculés sont repris dans le tableau 1.

2.4. Analyse de la relation cerne-climat

L'analyse de relation cerne-climat a consisté en une série de corrélations de Pearson entre la chronologie maitresse de croissance (courbe standardisée) et les précipitations (mensuelles, saisonnières et années) pour une période commune de 100 ans (soit de 1910-2010). Les saisons ont été particulièrement définies par rapport aux fluctuations de niveaux de précipitations. Les données de précipitations ont été extraites à partir du site KNMI Climate Explorer (http://climexp.knmi.nl/start.cgi), une base internationale des données climatiques, exploitée dans le cadre de nombreuses études récentes (Mazza et al., 2014 ; De Ridder et al., 2014 ; Feteke et al., 2016). Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2012) en utilisant les extensions (ou packages) dédiées à la dendrochronologie (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Campelo et al., 2012 ; Zang et Biondi, 2015) ainsi que les scripts developpés sous l'application DENDRO (Merian, 2012).

3. Résultats

3.1. Statistiques de chronologies de croissance de deux espèces

La courbe chronologique de croissance de *M. excelsa*, établie à partir d'un échantillon de 11 arbres de diamètre moyen de 90 cm, couvre une période maximale de 129 ans (1885-2014) (figure 4). En ce qui concerne *P.elata*, la chronologie de croissance construite s'étend de 1885 à 2014, couvrant une période maximale de 116 ans, commune à l'ensemble de 5 arbres échantillonnés (figure 4). Les paramètres statistiques décrivant les chronologies construites et les séries temporelles utilisées sont présentées dans le tableau 2. La largeur moyenne de cerne estimée pour *M. excelsa* est de 3,75 mm avec une variabilité plus ou moins forte (Ecart-type de 0,90). Visuellement, la courbe sur la figure 4a indique une croissance soutenue au premier stade de développement qui tend à diminuer avec l'âge (lire la courbe dans le sens inverse de 1885 à 2014). Une forte variabilité est ainsi observée dans la largeur de cernes. Le coefficient d'autocorrélation (Ar) calculé sur la série chronologie brute donne une valeur moyenne égale à 0,57. Cette valeur indique, dans l'ensemble, un faible effet de persistance, c'est-à-dire, la largeur de cerne à l'année *t* dépend moins de celles des années précédentes (*t-n*). La valeur moyenne de la sensibilité de la même chronologie des séries brutes est de 0,43 (inférieur à 1), indique que la largeur de cerne varie considérablement d'une année à l'autre et s'explique par la variabilité des largeurs des cernes de *M. excelsa* comme décrit ci-haut. Le paramètre EPS « Expressed Population Signal » de la courbe standardisée (figure 4b et 4e) a été estimée à 0,63 (valeur inférieure au seuil de 0,85), ce qui correspond à un signal commun moyen.

Les largeurs de cernes oscillent autour de la valeur moyenne de 2,25 mm avec un écartype de 0,25 mm pour les séries temporelles brutes de *P. elata*. Pour l'ensemble de 5 arbres échantillonnés, une faible variabilité des largeurs de cerne a été observée (figure 4b). Comparée à *M. excelsa*, la valeur de la sensitivité moyenne obtenue (0,38) est faible et explique que la largeur de cernes varie peu d'une année à l'autre. Le calcul sur la chronologie a donné une valeur légèrement élevée du coefficient d'autocorrélation (0,62), cela traduit un effet de persistance du signal environnemental d'une année à la suivante dans l'élaboration du cerne. Enfin, l'estimation du paramètre EPS a indiqué un signal commun faible 0,52 pour les arbres de *P. elata.*

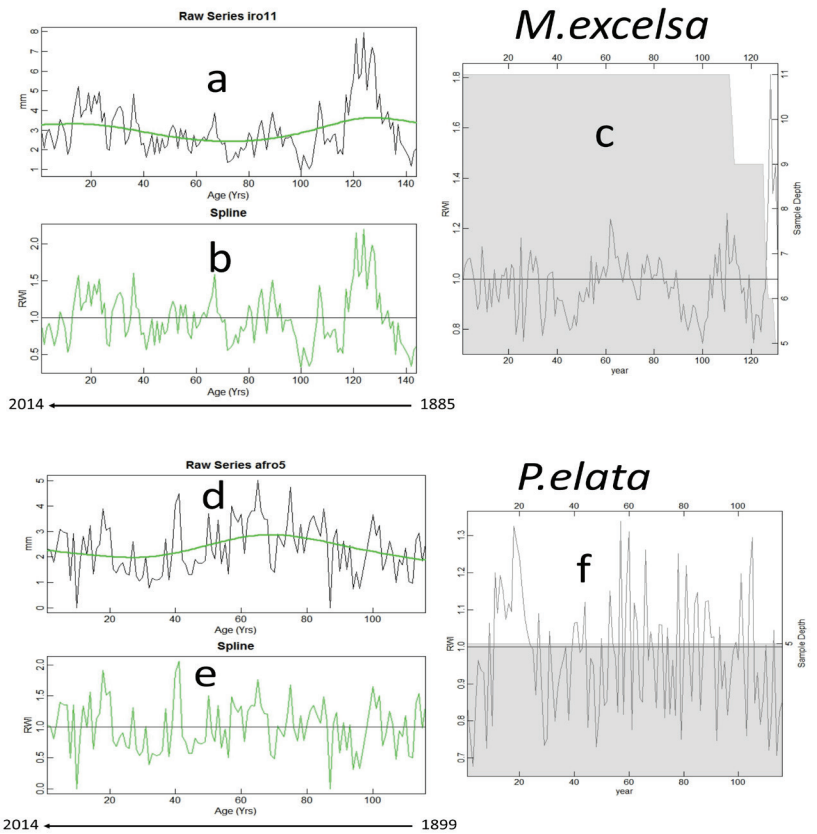

Figure 4 : Courbes chronologiques de croissance de M. excelsa et P. elata: (a-d) Série brute de largeurs de cerne (Raw, mm) avec la courbe représentant l'ajustement d'une spline (Cook et Peters, 1981) utilisée pour la standardisation ; (b-e) Série chronologique standardisée avec les indices de croissance (RWI) obtenus par division, pour chaque année, de la largeur de cerne brute par la valeur de la spline cubique avec la barre indiquant la valeur moyenne ; (c-f) Nombre d'échantillons (Sample depth) inclus dans la chronologie à travers le temps

3.2. Réponses des croissances des arbres aux précipitations

La série d'analyses de corrélation réalisée entre les indices de croissance (chronologie boostrapped) et les précipitations sur la période de 1910 à 2010, a permis de générer le graphique (figure 5) qui laisse apparaitre les valeurs de coefficients de Pearson (r) pour les variations mensuelles, saisonnières et annuelles de précipitations. A l'échelle de notre zone d'étude, les résultats ont révélé qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les chronologies de croissance de deux espèces (*M. excelsa* et *P. elata*) et le total annuel de précipitations, ce qui indique que les rythmes de croissance de ces espèces ne sont pas contrôlés à long terme par ce paramètre climatique. Il en est de même, en considérant les précipitations mensuelles de janvier à décembre pour la période de 1910 à 2010. Le seuil de corrélation acceptable (95%) n'ayant pas été atteint, il est à ce stade difficile d'expliquer le lien qui existe entre les niveaux de précipitations et les indices de croissance annuels obtenus (figure 4b-e).

La chronologie de croissance de *M. excelsa* a été négativement corrélée avec les précipitations de mois de janvier, mars, juin et octobre et des valeurs de r positifs pour le reste des mois. Une tendance différente a été cependant observée pour *P. elata* : des corrélations positives ont été observées entre la croissance des arbres de cette espèce et les précipitations pour les mois de février, septembre, octobre et novembre. Des tendances contraires ont été observées pour le reste de mois. Par ailleurs, en analysant les deux périodes de pics de précipitations observés habituellement au cours de l'année (cf. figure 2c), il apparait une corrélation significative au seuil de 95% entre la somme de

Tableau 2 : Caractéristiques statistiques générales de chronologies et séries de M.excelsa et de P. elata dans les forêts semi-caducifoliées de la région de Kisangani (Nord-Est de la RD Congo)

Caractéristiques générales	Espèce	
	M. excelsa	P. elata
Nombre d'arbres échantillonnés (N)	11	5
Diamètre moyen (cm, ±Ec)	90±10	86±10
Période maximale (an)	1885-2014	1889-2014
Largeur moyenne de cernes (LC) (mm, ±Ec)	3,75±0,90	2,25±0,25
Sensibilité moyenne (Msb)	0,43	0,38
Autocorrélation d'ordre 1 (Ar)	0,57	0,62
Expressed Population Signal (EPS) *	0,63	0,52

Ec- Ecartype et (*) - Paramètres statistiques calculés seulement sur la chronologie standardisée

précipitations de la première vague de pluies (avril-mai) et la chronologie de croissance de *M. excelsa* (r=0,211 ; p≤0,05). La chronologie de *P. elata* a été plus significativement corrélée à la somme de la seconde vague de précipitations (septembre-octobre-novembre), avec une valeur de r=0,241 (p≤0,05).

4. Discussions

Dans cette étude, les cernes de croissance de *Milicia excelsa* et de *Pericopis elata* ont été analysés en lien avec les variations climatiques (les précipitations locales en particulier) dans le contexte des forêts semi-décidues du Nord-Est de la République Démocratique du Congo. La particularité de cette étude réside, tout d'abord, dans l'utilisation des outils SIG en phase de préparation des échantillons et mesures des largeurs de cernes. L'expérience de ce travail a montré que l'usage de ces outils facilite les travaux de dendrochronologie. Ensuite, l'analyse de relation cerne-climat a permis de mettre en évidence le rôle des précipitations (première vague de pluies de l'année) dans les rythmes de croissance de *M. excelsa* et de *P. elata*. Les synchronisations observées entre les indices de croissance et les variations saisonnières de précipitations constituent de preuves de plus du caractère annuel de cernes de ces deux espèces.

4.1. Avantages des méthodes de mesure des cernes utilisant les outils SIG

Les travaux sur les analyses de cernes ont la réputation d'être difficile et chronophage. Les techniques et méthodes utilisées en dendrochronologie nécessitent des équipements et de logiciels qui ne sont pas toujours

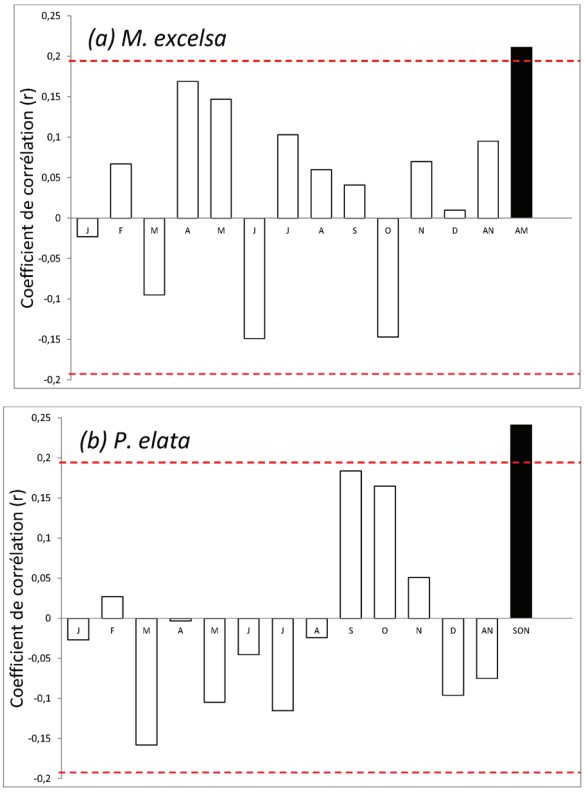

Figure 5 : Corrélation entre les chronologies de croissance de deux espèces (a- M. excelsa et b- P. elata) et les précipitations locales pour la période de 1910 à 2010. Les lignes rouges en pointillés représentent les seuils de significativité (P<0.05)

à la portée des chercheurs évoluant dans ce domaine, et ce à cause des contraintes financières. Pour pallier aux quelques problèmes susmentionnés, l'utilisation des logiciels SIG et de technologies d'imagerie récemment développées a été proposée par plusieurs auteurs (Castro et al., 2016). L'approche utilisée dans le cadre de la présente étude sur l'analyse de cernes de croissance exploite principalement les fonctionnalités fournies par le logiciel SIG (ArcMap), renforcées par le logiciel Photoscan utilisé en photogrammétrie. Comparée aux méthodes et équipements classiques d'analyses de cernes, cette approche présente de nombreux avantages, (Richard, 2012 ; Ilunga et al., 2017b): possibilité de travail sur ordinateur avec une grande liberté (sans les échantillons), facilité de stockage des échantillons de bois (cartographie virtuelle), précision de mesures (1/100000 mm), facilité dans la mise à jour et leur contrôle (modifications des limites de cernes), possibilité d'acquisitions de nombreuses données géométriques

(formes de disque). De plus, la méthode utilisant les outils SIG s'est révélée pratique par rapport à la taille de certaines rondelles utilisées (diamètre ≥100 cm). Cette étude constitue l'une des premières à expérimenter l'approche d'analyses basée sur l'utilisation des outils SIG (Système d'information géographique) pour des analyses dendrochronologiques en Afrique Centrale. De ce fait, l'expérience réalisée a permis de tirer quelques leçons qui mériteraient d'être intégrées dans le cadre d'études futures. Tel que mentionnée dans les études menées sur la base de la même méthode, Richard, (2012) et Ilunga et al. (2017b) affirme que la qualité des résultats dépend des performances réalisées en chaque phase de préparation et de traitements des échantillons de bois. La construction des ortho-images et le référencement des scans sont particulièrement les phases les plus délicates qu'il faut réaliser avec beaucoup d'attention.

4.2. Potentiel dendrochronologique des espèces de forêts tropicales

De manière générale, une espèce peut être soumise à l'analyse dendrochronologique si elle possède des cernes bien distincts (visible à l'œil nu ou au microscope), ayant un caractère annuel. Contrairement aux arbres des forêts tempérées et boréales, une large fraction d'espèces de forêts tropicales ne satisfait pas à ces deux conditions (visibilité et annualité de cernes). Les bois d'arbres tropicaux ont la réputation de posséder des cernes à structures anatomiques très complexes et souvent peu indistincts rendant leur délimitation difficile (Jacoby, 1989) dans le processus de datation. En outre, des grandes variabilités sont observées entre et/ou au sein des espèces. Différentes espèces d'arbres poussant dans un même site peuvent avoir des limites de cernes caractérisés par des éléments anatomiques différents (Hayden, 2008). Dans un même site, il peut arriver également que les arbres d'une même espèce laissent apparaitre des structures anatomiques différentes au niveau des limites de cernes (Hayden, 2008). A côté de tous les éléments susmentionnés, il existe des anomalies de cernes, notamment les faux cernes, doubles cernes et les cernes nuls ou partiels (wedging rings) (Worbes, 2002 ; Brienen et Zuidema, 2005; Wils et al., 2011; Gebrekirstos et al., 2014).

La particularité des cernes des arbres tropicaux tient aussi à leur périodicité qui peut être annuelle, bisannuelle ou irregulière. En effet, le fonctionnement périodique de l'activité cambiale peut être influencé en régions tropicales, soit par la sécheresse, soit par la défoliation (Worbes, 2002). Dans les études pionnières menées en Afrique tropicale, Mariaux (1967), Détienne et Mariaux (1975), Detienne (1976), la périodicité de cernes a été souvent prouvée par la méthode des blessures cambiales (fenêtres de Mariaux). A côté de cette technique, d'autres méthodes sont également utilisées pour déterminer la périodicité des cernes ou leur caractère annuel (Worbes, 1995) : Suivi phénologique ; mesures périodiques répétées de diamètre, mesures de l'activité cambiale avec le shigomètre, analyse de la structure anatomique de limites de cernes, comptage des cernes d'arbres d'âge connu, datation au Carbone 14, analyse des séries chronologiques (cross-dating en anglais). Par la dernière technique, la synchronisation des séries entre les arbres d'une ou plusieurs espèces ou entre plusieurs sites constitue souvent une évidence que la formation de cernes suit une périodicité annuelle (calendrier annuel).

Concernant les deux espèces étudiées, les images haute-résolution utilisées (1600 dpi) dans le cadre de ce travail ont laissé apparaitre clairement des cernes dont les limites sont formées par les fines bandes de parenchyme marginal (cf. figure 1). Ces dernières constituent l'un de types de structures anatomiques généralement faciles à distinguer, même à l'œil nu, après ponçage des échantillons de bois. Les difficultés rencontrées en phase de datation sont plus liées à la présence des anomalies de cernes, particulièrement la présence de cernes nuls. Heureusement, l'usage des disques plutôt que des carottes ou barreaux (Latte et al., 2015) a permis de détecter un bon nombre de ces anomalies et de corriger les différences de cernes entre les séries élémentaires au sein de certains arbres. En conclusion, les deux espèces, *M. excelsa* et *P. elata*, ont montré un plus ou moins bon potentiel pour le développement des chronologies : les cernes de ces arbres peuvent être datés et exploités dans le cadre des analyses cerne-climat tel que cela a été démontré par d'autres études à notre connaissance (Détienne, 1976; Nzogang, 2009 ; De Ridder et al., 2014).

4.3. Influence de précipitations sur les rythmes de croissance des arbres en forêts tropicales

La dendrochronologie est aujourd'hui reconnue comme un outil important pouvant aider à affiner les connaissances non seulement sur l'autoécologie des espèces, mais aussi sur la dynamique des forêts (dendroécologie). Depuis une vingtaine d'années, il y a plus qu'avant un regain d'intérêts pour la dendrochronologie en raison de ses applications dans le domaine de climatologie (dendroclimatologie) (Fritts et Swetnam, 1989 ; Fritts et al., 1991; Fritts, 1992 ; Worbes, 2002; Krepkowski et al., 2012; Lebourgeois

et Merian, 2012; Gebrekirstos et al., 2014). En effet, dans le contexte actuel d'instabilité climatique, la compréhension de la réponse des écosystèmes forestiers aux modifications environnementales ainsi que de leur capacité de résilience est devenue un enjeu majeur (Mbow et al., 2013 ; Lebourgeois et al., 2012 ; Larocque, 1996) et l'utilité de la dendrochronologie est particulièrement grande à ce titre.

Basée sur l'analyse des cernes de *M. excelsa* et *P. elata*, cette étude a permis de construire des chronologies de croissance et de les confronter aux séries de précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles pour la période de 1910-2010. Bien que les chronologies établies n'ont pas été statistiquement robustes (surtout pour le cas du *P. elata*), les résultats ont néanmoins révélé que la croissance des arbres est influencée par les niveaux des précipitations saisonnières, comme cela a été observé dans de nombreuses études menées en régions tropicales et ailleurs (Worbes, 1999 ; Brienen et Zuidema, 2005; Schongart et al., 2005 ; Trouet et al., 2006 ; Therrell et al., 2006 ; Couralet et al., 2010 ; Rozas et Miguel, 2013 ; Gebrekirstos et al., 2014; De Ridder et al., 2014). Comme mentionné plus haut, les précipitations annuelles dans notre zone d'étude oscillent autour de 1700 mm/an avec cependant des variabilités saisonnières plus ou moins considérables (130±50 mm/mois) (Cf. figure 2c). On compte une petite sèche de janvier-février (<100mm) et une saison de pluies de mars à décembre avec des conditions sèches observées entre juin-juillet. Cela donne l'image de quatre périodes importantes au cours de l'année : deux périodes de pluies (mars-juin et août-décembre) et deux périodes sèches (janvier-février et juin-juillet). Le diagramme de corrélation (figure 4) a donné un schéma global de l'influence de fluctuations de précipitations sur la croissance des arbres durant les quatre périodes susmentionnées. Il a en outre révélé que les précipitations peuvent présenter des contrastes importants pouvant probablement susciter de limitations biologiques (arrêt de végétation).

La corrélation positive et significative obtenue ($r=0,211$, $P\leq0,05$) entre la chronologie de *M. excelsa* et la combinaison de précipitations de mois d'avril-mai pourrait essentiellement s'expliquer par la forte sensibilité de la croissance des cernes aux apports hydriques au début de la saison des pluies (premier pic). En effet, il a été rapporté dans certaines études (Worbes, 1999; Brienen et Zuidema, 2005) que le rythme de croissance est plus fort au début de la saison des pluies et diminue plus tard dans la saison. Le ralentissement de la croissance est parfois dû à la diminution des capacités photosynthétiques des feuilles plus anciennes (Mooney et al., 1981 ; Brienen et Zuidema, 2005). Le pic des précipitations au mois d'octobre (deuxième moitié de l'année) semble dépasser le seuil de tolérance de *M. excelsa*, et les effets de cette surabondance pourrait justifier la corrélation négative observée en cette période. Parallèlement aux périodes de pluies, les débuts de conditions sèches (baisse de précipitations) sont marqués par de corrélations négatives, tel qu'observé aux mois de janvier ($r=-0.024$) et Juin ($r=-0.149$). Les mois de février et de juillet qui se situent dans la transition entre les périodes sèches et pluvieuses sont particulièrement caractérisés par une corrélation positive entre la croissance des cernes et les niveaux de précipitations. A ce stade actuel, les explications claires à ces tendances n'ont pas été trouvées par la rareté d'informations détaillées relatives à l'écologie de l'espèce dans la région. Il en est de même pour des schémas observés aux mois de mars et d'octobre. Enfin, pour le mois de décembre, la faible corrélation pourrait s'expliquer par une baisse de croissance aussi indépendante de la quantité des précipitations. Les investigations phénologiques menées dans des conditions de pluviométrie similaire (1550 mm par an) rapportent que l'espèce *M. excelsa* perd les feuilles à la fin de la grande saison de pluies (décembre), ce qui induit un ralentissement de la croissance (Daïnou, 2012).

Contrairement à *M. excelsa*, la croissance de *P. elata* a été significativement corrélée avec les précipitations de la seconde vague de pluies (soit du mois de septembre à novembre). Cette tendance a été également observée par De Ridder et al. (2014) qui a construit la première chronologie de l'espèce *P. elata* dans la même région. Par ailleurs, l'analyse de la réponse des individus de cette espèce aux variations saisonnières de précipitations a permis de dégager des tendances variées (corrélations négatives et positives) qui paraissent difficile à expliquer en l'absence de données phénologiques fiables sur l'espèce. Toutefois, la différence observée entre *M. excelsa* et *P. elata* en termes de réponse aux fluctuations des précipitations n'est pas étonnante, elle pourrait se justifier par les traits physiologiques, fonctionnels ou exigences abiotiques spécifiques à chaque espèce. De plus, quelques études (Brienen et Zuidema, 2005 ; Couralet et al., 2010) ont démontré que deux ou plusieurs espèces ayant le même tempérament et évoluant dans les mêmes conditions environnementales, peuvent avoir les mêmes sensibilités aux précipitions mais à de saisons différentes (Brienen et Zuidema, 2005 ; Couralet et al., 2010).

5. Conclusion

Cette étude a montré que la dendrochronologie est un outil efficace pour affiner nos connaissances sur la réponse de la croissance des arbres aux facteurs environnementaux tels que le climat. Les chronologies de croissance établies constituent des preuves que les deux espèces peuvent former des cernes annuels dans les conditions de forêts denses semi-caducifoliées. Les résultats de nos analyses ont également permis de mettre en évidence l'influence des précipitations sur les rythmes de croissance des cernes. Dans le contexte actuel d'instabilité environnementale, il est souhaitable d'accroitre ce genre d'études et d'utiliser les résultats dans les perspectives de modélisation de la croissance ainsi que de la prédiction des scénarios des effets du climat sur la santé des écosystèmes.

Notre étude suggère particulièrement que, dans l'avenir, des suivis phénologiques et des variations saisonnières de croissance soient menés afin de mieux comprendre et expliquer l'influence des précipitations mensuelles. Il serait également intéressant de mener une étude multi-espèces dans la même région (même contexte écologique) pour détecter, à quel niveau les traits fonctionnels des espèces modulent les réponses au climat. Enfin, il est recommandé d'étudier la réponse au climat au sein d'une même espèce se retrouvant dans des gradients écologiques différents, tout en considérant simultanément les effets d'autres facteurs (sol, altitude, état de perturbations, etc.).

Remerciements

Nos remerciements vont à l'endroit de nombreux partenaires qui ont contribué financièrement ou techniquement à cette étude : Global Climate Alliance (GCCA), le projet « Forêt et Changement Climatique au Congo », le Musée Royal de l'Afrique Centrale de Tervuren (MRAC), la société CFT« Compagnie Forestière et de Transformation », le CIFOR « Center for International Forestry Research », l'Université de Kisangani, la Faculté de Gembloux Agro-Biotech (Université de Liège) ainsi que le projet FORETS. Nous remercions particulièrement le Professeur Alphonse Maindo, Directeur de Tropenbos RDC, pour nous avoir fourni un cadre de travail durant la rédaction de cet article.

Bibliographie

Abensperg-Traun, M. (2009). CITES, sustainable use of wild species and incentive-driven conservation in developing countries, with an emphasis on Southern Africa. *Biol. Conserv.*, 142, pp. 948-963.

Biondi, F. et Qeadan, F. (2008). A Theory-driven approach to tree-ring standardization : Defining the Biological trend from expected basal area increment, Tree-ring research, 64, pp. 81–96.

Bizoux, J.P., Dainou, K., Bourland, N., Hardy, O., Heurtz, M., Mahy, G. et Doucet, J. (2009). Spatial genetic structure in Milicia excelsa (Moraceae) indicates extensive gene dispersal in a low-density wind-pollinated tropical tree, *Molecular ecology*, 18, pp. 4398–4408. DOI:10.1111/j.1365-294X.2009.04365.x

Bourlands, N., Kouadio, Y.L., Feteke, F., Lejeune, P. et Doucet, J.L. (2012). "Ecology and management of Pericopsis elata (Harms) Meeuwen (Fabaceae) populations: a review". *Base*, vol.4, no.16, pp. 486-498.

Brienen, R.J.W. et Zuidema, P.A. (2005). Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests : a test for six species using tree ring analysis, *Oecologia*, 146, pp. 1-12. DOI:10.1007/s00442-005-0160-y

Brienen, R.J.W. et Zuidema, P.A. (2006). The use of tree rings in tropical forest management: Projecting timber yields of four Bolivian tree species, *Forest Ecology and Management*, 226, pp.256–267. DOI:10.1016/j.foreco.2006.01.038

Boyemba, F. (2011). Ecologie de Pericopsis elata (Harms) Van Meeuwen (Fabaceae), arbre de forêt tropicale africaine à répartition agrégée, *Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles,* Bruxelles, Belgique, pp.26-32.

Bunn, A.G. (2008). A dendrochronology program library in R(dplR), *Dendrochronologia*, 26, pp. 115–124. DOI:10.1016/j.dendro.2008.01.002

Bunn, A.G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library, *Dendrochronologia*, 28, 251–258. DOI:10.1016/j.dendro.2009.12.001

Campelo, F., García-González, I., Nabais, C. (2012). DetrendeR – A Graphical User Interface to process and visualize tree-ring data using R, *Dendrochronologia*, 30, pp. 57–60. DOI:10.1016/j.dendro.2011.01.010

Castro, S.A., Haeger, J.F. et Barbudo, D.J. (2015). A method for tree-ring analysis using Diva-Gis freeware on scanned core images, *Tree-ring research*, Vol. 71(2), 118-129.

Catinot, R. (1970). Premières réflexions sur une possibilité d'explication physiologique des rythmes annuels d'accroissement chez les arbres de la forêt tropicale africaine, *Bois et Forêts des Tropiques*, 131, pp. 3–34.

Cook, E.R. et Peters, K. (1981). The Smoothing Spline : A New approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies, *Tree-ring Bulletin*, 41, pp. 45–53.

Couralet, C., Sterck, F.J., Sass-klaassen, U., Van Acker, J. et Beeckman, H. (2010). Species-specific growth responses to climate variations in understory trees of a Central African Rain Forest, *Biotropica*, pp. 1-9.

Daïnou, K. (2012). Structuration de la diversité génétique du genre Milicia : taxonomie, phylogéographie, dynamique des populations, *Thèse de doctorat, Université de Liège*, Gembloux, Belgique, 187 p.

Daïnou, K., Doucet, J., Sinsin, B., Mahy, G. (2012). Identité et écologie des espèces forestières commerciales d'Afrique centrale : le cas de Milicia spp. (synthèse bibliographique). *BASE*, 16, 229–241.

De Ridder, M., Van Den Bulcke, J., Van Acker, J. et Beeckman, H. (2013). Forest ecology and management tree-ring analysis of an African long-lived pioneer species as a tool for sustainable forest management, *Forest Ecology and Management*, 304, pp. 417–426. DOI:10.1016/j.foreco.2013.05.007

De Ridder, M., Toirambe, B., Van Den Bulcke, J., Bourland, N., Van Acker, J. et Beeckman, H. (2014). Dendrochronological potential in a semi-deciduous rainforest: the case of Pericopsis elata in Central Africa, *Forests* 5, 3087–3106. DOI: 10.3390/f5123087

De Rider, M., Hubau, W., Van Den Bulcke, J., Van Acker, J. et Beckman, H. (2010). The potential of plantations of Terminalia superba Engl . & Diels for wood and biomass production (Mayombe Forest, Democratic Republic of Congo), *Annals of Forest Science*, 67, pp. 1-12. DOI: 10.1051/forest/2010003

Détienne, P. et Mariaux, A. (1975). Nature et périodicité des cernes dans le bois de Niangon, *Bois et Forêts des Tropiques*, 159, 29–37.

Detienne, P. (1976). Nature et périodicité des cernes dans le bois d'iroko, Rapport, Centre Technique Forestier Tropical, Norgent-sur-Marne, 27 p.

Détienne, P. et Mariaux, A. (1997). Nature et périodicité des cernes dans les bois rouges de méliacées africaines, *Bois et Forêts des tropiques*,175, pp. 52–61.

Détienne, P., Oyono, F., Durrieu de Mandron, L., Demarquez, B. et Nasi, R. (1998). L'analyse de cernes : applications aux études de croissance de quelques essences en peuplements naturels de forêt dense africaine, *CIRAD, série Forafi*, Montpellier, n°15. CD-Rom.

DIAF/MECNT (2009). Liste des essences forestières de la République Démocratique du Congo- *Guide opérationnel,* Division d'Inventaire et Aménagement Forestier, Kinshasa, RDC, 52 p.

Fayolle, A., Ouédraogo, D., Ligot, G., Daïnou, K., Bourland, N., Tekam, P. et Doucet, J.L. (2015). Differential performance between two timber species in Forest logging gaps and in plantations in Central Africa, *Forests* 6, pp. 380–394. DOI: 10.3390/f6020380

Feteke, F., Fayolle, A., Dainou, K., Bourland, N., Die, A., Lejeune, P., Doucet, J.L. et Beeckman, H. (2016). Variations saisonnières de la croissance diamétrique et des phénologies foliaire et reproductive de trois espèces ligneuses commerciales d'Afrique Centrale, *Bois et Forêts des Tropiques*, 330, pp.4-21.

Fritts, H. et Dean, J.S. (1992). Dendrochronological modeling of the effects of climatic change on tree-ring width chronologies from the chaco, canyon area, Southwestern United States, *Tree-ring Bulletin*, 52, pp.31-58.

Fritts, H. et Swetnam, T. (1989). Dendroecology : A Tool for evaluating variations in past and present forest environments, *Advances in ecological research*, 19, pp. 111–188.

Fritts, H., Vagonov, E., Sviderskaya, I. et Shashkin, A. (1991). Climatic variation and tree-ring structure in conifers: empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall thickness and wood density, *Climate Research*, 1, 97–116.

Forest Ressources Management (FRM) (2008). Plan d'aménagement superficie sous aménagement - Ubundu 2008-2012 / Concession 36/04B, *Rapport de Mission*, Kisangani, RDC, pp.1-80.

Gebrekirstos, A., Bräuning, A., Sass-Klassen, U. et Mbow, C. (2014). Opportunities and applications of dendrochronology in Africa, *Current Opinion*

in Environmental Sustainability, 6, pp. 48–53. DOI:10.1016/j.cosust.2013.10.011

Groenendijk, P., Sass-klaassen, U., Bongers, F. et Zuidema, P. (2014). Potential of tree-ring analysis in a wet tropical forest : a case study on 22 commercial tree species in Central Africa, *Forest Ecology and Management*, 323, pp. 65–78. DOI:10.1016/j.foreco.2014.03.037

Hayden, B. (2008). Annual growth rings in dry tropical forest trees, *Mémoire Master, Concordia University,* Montréal, Canada, 114 p.

Ilunga, C., Sabongo, P., Komba, J., Ayaya, I. et Ndjele, L. (2017a). Growth rings of African timber described by an approach using Gis tools: Case of Milicia excelsa, *African Journal of Wood Science and Forestry*, 5, pp. 320-332.

Ilunga, C., Komba, J., Mbayu, F., Sabongo, P. et Ndjele, L. (2017b). Estimation de la croissance d'essences tropicales africaines à travers une méthode basée sur l'utilisation des outils SIG, International *Journal of Innovation and Applied Studies*, 21, pp. 536–546.

Jacoby G.C. (1989). Overview of tree ring analysis in tropical regions. Growth rings in tropical trees. *IAWA Bulletin*, 10(2), 99-108.

Kahindo, J.M. (2011). Potentiel en produits forestiers autres que le bois d'œuvre dans les formations forestières de la région de Kisangni. Cas des rotins Eremospatha haullevilleana De Wild et Lacosperma seconduflorum (P. Beauv.) Küntze de la Réserve forestière de Yoko (Province Orientale, RDC), *Thèse de doctorat, Université de Kisangani*, Kisangani, DRC, 269 p.

Krepkowski, J., Bräuning, A. et Gebrekirstos, A. (2012). Dendrochronologia growth dynamics and potential for cross-dating and multi-century climate reconstruction of Podocarpus falcatus in Ethiopia, *Dendrochronologia*, 30, pp. 257–265. DOI:10.1016/j.dendro.2012.01.001

Larocque, G. (1996). Importance de différents paramètres climatiques sur la croissance et la formation du bois de pin rouge (Pinus resinosa Ait) en Ontario (Canada), *Annals of Science Forestry*, 54, pp. 51–63.

Lebourgeois, F. (2010). Principes et méthodes de la dendrochronologie, *Laboratoire d'Etude des Ressources Foret-Bois (LERFOB)*, Nancy, 94 p.

Lebourgeois, F. et Merian, P. (2012). Principes et méthodes de la dendrochronologie*, Laboratoire d'Etude des Ressources Foret-Bois (LERFOB)*, Nancy, 132 p.

Lebourgeois, F., Merian, P., Courdier, F., Ladier, J. et Dreyfus, P. (2012). Réponse au climat et à ses variations au cours du XXe siècle du sapin pectiné, du hêtre, des pins noir, sylvestre et à crochets en contexte méditerranéen montagnard, *Revue Forestière Française*, 64, pp.107–126.

Mariaux, A. (1967). Les cernes dans les bois tropicaux africains, nature et périodicité. Peuvent-ils révéler l'âge des arbres?, *Bois et Forêts des Tropiques*, 113, pp. 3–14.

Mayaux, P., Descle, B., Clerici, M., Bodart, C., Lupi, A., Brink, A., Nasi, R. et Belward, A. (2013). State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010, *Philosophical Transactions of Royal Society*, B368: 20120300 [En ligne] URL: http://dx.di.org/10.1098/rstb.2012.0300.

Mazza, G., Galluci, U., Manetti, M.C. et Urbinati, C. (2014). Climate-growth relationships of Silver for (Abies alba Mill.) in marginal populations for Central Italy, *Dendrochronologia*, 32, pp. 181-190. [En ligne] URL: http://dx.di.org/10.1016/j.dendro.2014.04.004

Mbayu, F.M. (2017). Forêt à Marantaceae et son impact sur la régénération de ligneux dans la reserve forestière de Yoko (Ubundu, Province de la Tshopo, RD Congo), *Thèse de doctorat, Université de Kisangani*, Kisangani, Belgique, pp.2-10.

Mbow, C., Chhin, S., Sambou, B., Skole, D. (2013). Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa, *Dendrochronologia*, 31, pp. 41–51. DOI:10.1016/j.dendro.2012.06.001

Mérian, P. (2012). Pointer et Dendro : deux applications sous R pour l'analyse de la réponse des arbres au climat par approche dendroécologique [En ligne] URL: *https://sites.google.com/site/pierreemerian/rscripts*

Mooney, H., Field, C., Gulmon, S., Bazzaz, F. (1981). Photosynthetic capacity in relation to

leaf position in desert versus old-field annuals, *Oecologia (Berl)*, 50, pp. 109–112.

Nzogang, A. (2009). Tropical forest dynamics after logging - natural regeneration and growth of commercial tree species in southeast Cameroon, *Thèse de doctorat, Université d'Albert Ludwigs, Freiburg* im Breisgau, Allemagne, 200 p.

Onefeli, A.O. et Agwu, P.O. (2015). Prospect of Milicia excelsa (Welw .) C . Berg for Multi-Tree Species Agroforestry, *South-East Eurppean Forestry*, 6, 249–256. [En ligne] URL: http://dx.doi.org/10.15177/seefor.15-21

Ouinsavi, C. et Sokpon, N. (2010). Morphological variation and ecological structure of Iroko (Milicia excelsa Welw. C.C. Berg) populations across different biogeographical zones in Benin. *International Journal of Forestry Research*, pp. 1–10. DOI:10.1155/2010/658396

Picard, N. et Gourlet-fleury, S. (2008). Manuel de référence pour l'installation de dispositifs permanents en forêt de production dans le Bassin du Congo, COMIFAC, 258 p. [En ligne] URL: *http://hal.cirad.fr/cirad-00339816.*

Richard, P. (2012). Comparaison de systèmes d'acquisition d'images numériques pour l'analyse des sections transversales d'arbres de forêts denses humides africaines, *Mémoire Master, Université de Liège*, Gembloux, Belgique, 75 p.

Rozas, V. et Miguel, J. (2013). Dendrochronologia Environmental heterogeneity and neighbourhood interference modulate the individual response of Juniperus thurifera tree-ring growth to climate, *Dendrochronologia*, 31, pp.105–113. DOI:10.1016/j.dendro.2012.09.001

Schongart, J., Bettina, O., Hennernberg, K.J., Porembski, S. et Worbes, M. (2006). Climate-growth relationship of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction, *Global Change Biology*, 12, pp.1139-1150 [En ligne] URL: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2006.01154.x/full.

Therrell, M., Stahle, D., Lydia, R. et Shugart, H. (2006). Tree-ring reconstructed rainfall variability in Zimbabwe, *Climate Dynamics*, 26, 677–685. DOI: 10.1007/s00382-005-0108-2

Trouet, V., Coppin, P. et Beeckman, H. (2006). Annual growth ring patterns in Brachystegia spiciformis reveal influence of Precipitation on tree growth, *Biotropica*, 38, pp. 375–382. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2006.00155.x Annual

Wils, T.H., Sass-Klaassen, U.G., Eshetu, Z., Braüning, A., Gebrekirstos, A., Couralet, C., Robertson, I., Touchan, R., Koprowski, M., Conway, D., Briffa, K.R., Koprowski, M., Conway, D.D., et Beeckman, H. (2011). Dendrochronology in the dry tropics : the Ethiopian case. *Trees*, 25, pp. 345–354. DOI:10.1007/s00468-010-0521-y

Worbes, M. (1995). How to measure growth dynamics in tropical trees? *IAWA Journal*, 16, pp. 337–351.

Worbes, M. (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, pp.391–403.

Worbes, M. (2002). One hundred years of tree-ring research in the tropics - a brief history and an outlook to future challenges, *Dendrochrnologia*, 20, 217–231.

Worbes, M. et Raschke, N. (2012). Dendrochronologia carbon allocation in a Costa Rican dry forest derived from tree ring analysis, *Dendrochronologia* 30, pp. 231–238. DOI:10.1016/j.dendro.2011.11.001

Zang, C. et Biondi, F. (2015). Treeclim : an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships, *Ecography* (Cop.), 38, pp. 431–436. DOI:10.1111/ecog.01335