DYNAFAC

DYNAMIQUE DES FORÊTS D'AFRIQUE CENTRALE

POUR UNE AMÉLIORATION DE LA DURABILITÉ DES PLANS D'AMÉNAGEMENT FORESTIERS

CAPITALISATION DES PROJETS DYNAFFOR ET P3FAC

LISTE DES AUTEURS

Bérénice	Castadot	ATIBT	Vivien	Rossi	CIRAD
Benoit	Jobbe-Duval	ATIBT	Jean-Louis	Doucet	GxABT-ULiège
Fabrice	Bénedet	CIRAD	Adeline	Fayolle	GxABT-ULiège
Guillaume	Cornu	CIRAD	Gauthier	Ligot	GxABT-ULiège
Eric	Forni	CIRAD	Charles	Bracke	Nature+
Vincent	Freycon	CIRAD	Kasso	Daïnou	Nature+
Sylvie	Gourlet-Fleury	CIRAD	Franck	Monthe	Nature+

Remerciements à Bertrand Faucon et Geoffrey Langlinay pour la relecture et la mise en page de ce document

Les membres du collectif DYNAFAC

- **L' organisation internationale**
  COMIFAC

- **Les administrations nationales**
  - Ministère des Forêts et de la Faune du Cameroun
  - Ministère des Eaux et Forêts, de la Mer, de l'Environnement, chargé du Plan Climat, et du Plan d'Affectation des Terres au Gabon
  - Ministère de l'Économie Forestière en République Congo
  - Ministère des Eaux, Forêts, Chasse et Pêche en République Centrafricaine
  - Ministère de l'Environnement et Développement Durable en République Démocratique du Congo

- **Les associations**
  - ATIBT
  - Nature+

- **Les institutions et instituts de recherche**
  - CIRAD (France)
  - Gembloux Agro-Bio Tech -ULiège (Belgique)
  - ICRA (RCA)
  - INERA (RDC)
  - IRAD (Cameroun)
  - IRET (Gabon)
  - IRF (R. Congo)
  - Univ. Bangui (RCA)
  - ULB (Belgique)
  - UNIKIS (RDC)
  - Univ. Marien Ngouabi (Rép. Congo)
  - USTM-INSAB (Gabon)
  - Univ. de Yaoundé I-ENS (Cameroun)

- **Le secteur Privé**
  - ALPICAM-GRUMCAM
  - CIB – An Olam Group Company
  - IFO
  - Pallisco
  - PRECIOUS WOODS CEB
  - Rougier

Membres de la Commission Forêt & Industrie de l'ATIBT

TABLE DES MATIÈRES

1. Les défis des forêts de production d'Afrique centrale **6**

2. Mieux connaître les forêts de production pour mieux les gérer **8**

2.1. Deux types de dispositifs complémentaires : les parcelles et les sentiers **9**
2.2. Où installer les dispositifs et combien ? **11**
2.3. Pendant combien de temps et à quelle fréquence faudrait-il les suivre ? **12**

3. L'influence des facteurs environnementaux et historiques sur la structure et la diversité des forêts **13**

3.1. Un réseau DynAfFor partiellement représentatif de l'hétérogénéité des forêts d'Afrique centrale **13**
3.2. Des facteurs environnementaux et historiques variables au sein du réseau DynAfFor **15**

3.2.1. Un régime climatique pas aussi homogène que prévu 15
3.2.2. Des sols variant globalement en fonction du substrat géologique… et des termitières 16
3.2.3. Une influence anthropique avérée 18

3.3. Des forêts dont la structure, la biomasse et la diversité varient entre les sites **19**

3.3.1. Les facteurs influençant la structure et la biomasse 19
3.3.2. L'importance des arbres à tronc déformé, des petits arbres et des arbres morts dans l'estimation de la biomasse 23
3.3.3. Des compositions floristiques très différentes, une richesse et une diversité élevées 24
3.3.4. Une richesse sous-estimée 28

4. Une dynamique variable d'un site à l'autre, à l'échelle des peuplements comme à celle des populations **29**

4.1. La dynamique des peuplements **29**

4.1.1. Une croissance moyenne variant peu entre peuplements, les taux de mortalité et de recrutement davantage 29
4.1.2. Des modifications probables de la dynamique, de la structure et de la composition des forêts d'Afrique centrale sous l'effet du changement climatique 32
4.1.3. Le rôle essentiel de la banque de graines du sol 33

4.2. La dynamique des populations **34**

4.2.1. Une croissance moyenne très hétérogène des espèces suivies sur les sentiers 34
4.2.2. Des diamètres de reproduction à prendre en compte dans les décisions d'aménagement 38
4.2.3. Une dispersion des graines peu affectée par l'exploitation forestière 41

4.3. Le développement de modèles de dynamique pour prédire l'évolution des peuplements et des populations 43

4.4. L'utilisation de la télédétection pour caractériser les forêts et suivre leur évolution 44

5. La mobilisation et la formation des acteurs 47

5.1. Une forte interaction créée avec les partenaires locaux 47
5.2. Des équipes de terrain et de nombreux étudiants formés aux inventaires et à l'utilisation des données 47
5.3. De nombreux gestionnaires formés à l'utilisation du logiciel DafSim 47

6. Leçons apprises et perspectives 50

6.1. Des recommandations concrètes à appliquer 50

6.1.1. Des diamètres minimum d'exploitation écologiquement adaptés et uniformisés à l'échelle sous-régionale 50
6.1.2. Des règles strictes sur les semenciers et des normes améliorées de gestion de la faune 52
6.1.3. Des durées de rotation et des taux de reconstitution réalistes 52
6.1.4. La nécessité d'appuyer la régénération naturelle 56
6.1.5. Des sentiers indispensables, à rendre obligatoires dans les grandes concessions 56
6.1.6. Un réseau régional de dispositifs complets à mettre en place et à préserver 57

6.2. Se faire connaître et reconnaître 58

6.2.1. Mobiliser les administrations forestières nationales 58
6.2.2. Communiquer de manière efficace 59
6.2.3. Rien ne sert de produire des connaissances si elles ne sont pas utilisées 59

6.3. Perspectives : les nouveaux défis à relever 60

6.3.1. Vers de nouveaux plans d'aménagement 60
6.3.2. Vers un changement de paradigme : découpler exploitation et transformation 61

6.4. En bref 62

Annexe - Correspondance entre noms vernaculaires et noms latins 63

Bibliographie 65

Les partenaires des projets DynAfFor et P3FAC : des institutions, des entreprises et des centres de recherche unis pour faire progresser les connaissances 70

LISTE DES ACRONYMES

AFRITRON	African Tropical Rainforest Observation Network
ATIBT	Association technique internationale des bois tropicaux
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
COMIFAC	Commission des forêts d'Afrique centrale
CST	Comité scientifique et technique
DHP	Diamètre hauteur de poitrine
DYNAFAC	Dynamique des forêts d'Afrique centrale
DynAfFor	Structure et Dynamique des forêts d'Afrique centrale : vers des règles d'exploitation du bois intégrant le fonctionnement écologique des populations d'arbres et la variabilité des conditions environnementales
DF (DFR)	Diamètre de fructification
DMA	Diamètre minimum d'aménagement
DME	Diamètre minimum d'exploitation
ENEF	Ecole nationale des eaux et forêts (Cameroun)
ERAIFT	Ecole régionale d'aménagement et de gestion intégrée des forêts et des territoires tropicaux
FFEM	Fonds français pour l'environnement mondial
FSC	Forest stewardship council
LKTS	Lesser Known Timber Species
MNC	Modèle numérique de canopée
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
P3FAC	Partenariat Public-Privé pour gérer durablement les Forêts d'Afrique centrale
PFBC	Partenariat pour les forêts du bassin du Congo
PFNL	Produit forestier non ligneux
RAINFOR	Amazon Forest Inventory Network
RCA	République Centrafricaine
RBG	Red Blue Green
RDC	République Démocratique du Congo
R2FAC	Réseau de recherche sur les forêts d'Afrique centrale
T-Forces	Tropical Forests in the Changing Earth System
TmFO	Tropical managed Forest Observatory,
USTM	Université des sciences et techniques de Masuku (Franceville)

De 2013 à 2020, le Fonds Français pour l'Environnement mondial a cofinancé le projet « Structure et Dynamique des forêts d'Afrique centrale : vers des règles d'exploitation du bois intégrant le fonctionnement écologique des populations d'arbres et la variabilité des conditions environnementales (DynAfFor) ». Ce projet portait sur cinq pays, couvrant l'essentiel des forêts denses humides tropicales de la région : le Cameroun, le Congo, le Gabon, la République Centrafricaine (RCA) et la République Démocratique du Congo (RDC).

Le projet DynAfFor est né du constat que, pour assurer la durabilité de l'exploitation du bois d'œuvre dans les forêts d'Afrique centrale, il était indispensable de mieux connaître leur fonctionnement. Or, les données disponibles sur ces forêts étaient peu nombreuses et souvent anciennes. Elles étaient par ailleurs peu utilisées par les professionnels du secteur forestier et par les décideurs. Alors que les premiers plans d'aménagement, établis à la fin des années 1990 arrivent à leur terme, alimenter les réflexions sur les modalités de leur révision est fondamental afin de garantir une véritable gestion durable des massifs forestiers.

Le projet DynAfFor s'est fixé deux grands objectifs. Le premier était de quantifier les effets de l'environnement, de l'exploitation du bois, et de leurs interactions, sur la dynamique forestière et sur les processus qui la pilotent : la croissance, le recrutement[1] et la mortalité. Le projet devait pour cela constituer un réseau de dispositifs de suivi de la dynamique des populations et des peuplements[2] forestiers et doter les parties prenantes de la gestion forestière d'outils d'aide à la décision. Le deuxième objectif était, à partir des résultats générés et des outils développés, d'améliorer la connaissance et la pratique des acteurs de la région : les exploitants forestiers, les administrations forestières et les organismes de recherche.

Ces connaissances ont été intégrées dans des modèles de dynamique forestière mobilisables, grâce à un simulateur, par tous les acteurs intéressés par le devenir des forêts. Le projet a enfin soulevé les principaux problèmes auxquels seront confrontés les « forestiers du futur » actifs dans la région.

Ce document a pour vocation de synthétiser l'ensemble du travail accompli. Il est structuré en cinq parties.

1. LES DÉFIS DES FORÊTS DE PRODUCTION D'AFRIQUE CENTRALE

Les forêts denses humides d'Afrique centrale s'étendent sur 169 millions d'hectares (FRMi, 2018). Environ 31 % de ces forêts sont dédiées à la production de bois d'œuvre, dans le cadre de concessions délivrées par les Etats à des compagnies privées qui doivent les aménager. Aujourd'hui, environ 60 % de ces forêts, soit environ 30 millions d'hectares, sont sous un statut de concessions aménagées (FRA, 2015, FRMi, 2018).

1. Recrutement : nombre d'arbres qui apparaissent au-dessus d'un seuil dit de "précomptage", la plupart du temps un diamètre, à partir duquel ils entrent dans les inventaires. Ce diamètre est généralement de 10 cm dans les dispositifs de suivi de la dynamique forestière.
2. Population : ensemble d'individus présents sur un site et appartenant à une même espèce. Peuplement : ensemble d'individus présents sur un site et appartenant à des espèces différentes.

Depuis le début des années 2000 l'aménagement forestier, dans les pays concernés par le projet DynAfFor, vise la durabilité : c'est-à-dire qu'il doit garantir, selon l'Organisation internationale des bois tropicaux, « la fourniture continue des produits et services recherchés, sans réduction inutile des qualités intrinsèques ni de la productivité future de la forêt, et sans effet indésirable inutile sur l'environnement physique et social ». Toutes les fonctions des forêts doivent être préservées : écologiques, économiques et socio-culturelles.

Toutefois, le maintien de ces différentes fonctions n'est que rarement envisagé sur le long terme[3]. En effet, la plupart des concessions sont octroyées aux compagnies forestières pour des périodes limitées, correspondant souvent à une rotation (c'est-à-dire le temps écoulé entre deux passages successifs sur la même assiette de coupe), le plus souvent 20 à 30 ans en Afrique centrale. Au-delà de cette période, les sociétés privées n'ont aucune garantie de pouvoir exploiter les mêmes superficies. En conséquence, les décisions d'aménagement sont prises sur le court terme en respectant des textes législatifs trop peu contraignants sur la reconstitution[4] de la ressource (Tableau 1). En effet, s'il est compréhensible qu'une forêt exploitée pour la première fois ne puisse reconstituer 100 % de l'effectif ou du volume prélevés à l'issue de la première rotation, car ceux-ci se sont accumulés pendant des centaines d'années, n'autoriser qu'une reconstitution partielle de cet effectif ou de ce volume au-delà de la première rotation augmente le risque que l'aménagement ne soit pas durable.

Pays	Taux de reconstitution minimum	Remarque
Cameroun	50%	Par essence aménagée et pour l'effectif compris entre DMA(et DME+40 cm
Congo	75% 50%	Ensemble des essences des peuplements exploités Groupe essences commercialisées
Gabon	75% 70% 40%	Okoumé Groupe "bois divers" Essences prises individuellement
RCA	50% 50%	Groupe essences aménagées Par essence aménagée si possible
RDC	30% 50%	Par essence aménagée Groupe d'essences aménagées

Aujourd'hui, de nombreuses concessions forestières parviennent à la fin de la première rotation et les compagnies détentrices ou candidates à une reprise doivent réfléchir à la rédaction de leur nouveau plan d'aménagement. **La nécessité de reconstituer les ressources sur le long terme est un enjeu majeur : une forêt dont la production de bois est menacée parce qu'insuffisamment rentable risque d'être abandonnée par la compagnie qui l'exploite et transformée en zone agricole, faisant alors disparaître l'essentiel des fonctions remplies**

3. Les forestiers ont, en général, une vision sur le long terme. Nous considérons comme du court terme une période de 30 ans (plantations de peupliers par exemple, avec du très court terme pour les plantations d'Eucalyptus), du moyen terme une période de 100 ans (couvrant au moins 3 rotations), et du long terme une période de 600 à 1000 ans, lorsque l'équilibre du cycle sylvigénétique est atteint.
4. Reconstitution : nombre d'arbres étant passés au-dessus du diamètre d'exploitation divisé par le nombre d'arbres exploités. La reconstitution peut être évaluée en effectif ou en volume.
DMA (Diamètre minimum d'aménagement) et DME (Diamètre minimum d'exploitation)

par cette forêt, même exploitée. Cette prise en compte devient un véritable défi car d'une part, les prix des bois tropicaux sont à la baisse sur certains marchés internationaux et d'autre part, les marchés locaux prennent de l'ampleur du fait de de la transition démographique.

2. MIEUX CONNAÎTRE LES FORÊTS DE PRODUCTION POUR MIEUX LES GÉRER

Caractériser les forêts d'Afrique centrale peut se faire en croisant les informations issues d'inventaires floristiques divers, de données d'herbiers et de données provenant de dispositifs permanents. Plusieurs études ont été récemment menées sur ce sujet, à l'échelle de l'Afrique sub-saharienne (Linder et al., 2012, Fayolle et al., 2014, Sosef et al., 2017, Droissart et al., 2018), et de façon plus précise à l'échelle sub-régionale ou régionale de l'Afrique centrale (Fayolle et al., 2014, Betbeder et al., 2014, Réjou-Méchain et al., 2021), mettant en évidence l'hétérogénéité des forêts qui y sont présentes.

Cette hétérogénéité des forêts à l'échelle régionale est en partie due aux caractéristiques climatiques et à leur évolution depuis le dernier maximum glaciaire, à l'hétérogénéité des substrats géologiques et des sols qui en résultent, et à l'intensité des perturbations humaines passées et actuelles. Mais comment ces facteurs jouent-ils sur la dynamique de ces forêts et sur leur capacité à se reconstituer après une exploitation forestière ? Aucun dispositif robuste ne permet aujourd'hui de répondre à cette question et c'est la raison pour laquelle a été conçu le projet DynAfFor.

Pourtant, de nombreuses parcelles permanentes existent en Afrique centrale, généralement dédiées à l'étude et au suivi de la biodiversité (composition botanique, diversité floristique et fonctionnelle), de la structure et de la biomasse des forêts. Mais la plupart sont de petite taille (≤ 1 ha) et situées dans des forêts non exploitées ou dans des aires protégées (Picard et Gourlet-Fleury, 2008 ; Hubau et al., 2020). **De trop petite taille, elles ne permettent ni d'étudier précisément la dynamique des populations d'espèces commerciales, dont la densité locale est généralement faible, ni d'évaluer l'impact de l'exploitation, sur la dynamique des peuplements.** Modéliser le devenir des populations après une exploitation nécessite : (i) d'observer et de comparer leur évolution hors et sous effet de l'exploitation, et (ii) de suivre des superficies beaucoup plus grandes.

Le dispositif permanent le plus ancien d'Afrique centrale ayant permis d'évaluer la réponse des peuplements à l'exploitation de bois d'œuvre sur le moyen terme est celui de M'Baïki (Fig. 1). Implanté en République centrafricaine, il est suivi depuis 1982. Les données acquises ont permis de concevoir sur des bases rigoureuses les dispositifs du projet DynAfFor, en adaptant leur taille et leur forme et en les installant dans des zones écologiques contrastées représentatives de la majeure partie des forêts de production d'Afrique centrale.

Fig. 1. *Panneau d'entrée sur le dispositif de M'Baïki, installé en 1982 en République centrafricaine, à une centaine de km au sud-sud-ouest de Bangui (©A. Fayolle)*

2.1 DEUX TYPES DE DISPOSITIFS COMPLÉMENTAIRES : LES PARCELLES ET LES SENTIERS

L'exploitation forestière est théoriquement durable si ce que l'on prélève en forêt est entièrement reconstitué à la fin d'une rotation, c'est-à-dire 20 à 30 ans en Afrique centrale. Pour quantifier cette reconstitution, il faut suivre dans le temps la croissance et la mortalité d'un grand nombre d'arbres de différents diamètres, appartenant aux espèces commerciales. Celles-ci sont généralement présentes en faible densité. Il faut donc explorer une large superficie pour atteindre cet effectif. Pour des raisons d'efficience, il est recommandé de ne pas dépasser une superficie totale de 400 ha (Picard et Gourlet-Fleury, 2008).

Il est recommandé de suivre, pour chaque espèce, 20 arbres par classe de diamètre de 10 cm de large, dans 10 classes de diamètre allant de 10-20 cm à 100 cm et plus (diamètres à hauteur de poitrine ou DHP), soit 200 arbres au total. Les parcours qui relient les arbres ainsi sélectionnés sont appelés « sentiers ».

Les sentiers (Fig. 2) permettent de quantifier la croissance et la mortalité d'une population d'arbres mais pas leur recrutement. Ce processus est impossible à quantifier si l'on ne réalise pas un inventaire systématique et répété de tous les arbres présents sur de grandes superficies, il est donc impossible sur des sentiers. Les données acquises sur ces sentiers ne permettent donc pas de prédire l'évolution des populations sur un temps long, dépassant deux ou trois rotations.

Les parcelles sont des dispositifs complémentaires aux sentiers ; elles prennent en compte l'ensemble des arbres présents, de taille supérieure à un seuil fixé (appelé diamètre de précomptage) sur une surface bien délimitée. Les parcelles permettent ainsi d'étudier le recrutement mais aussi la densité des arbres, la surface terrière, le stock de carbone, la composition et la diversité floristique. Elles permettent également d'apporter des connaissances sur des espèces dites de promotion, potentiellement exploitables dans le futur. Les parcelles permettent donc une modélisation de l'évolution des peuplements et des populations sur le long terme.

Les parcelles doivent idéalement être installées au sein des 400 ha abritant les sentiers. Dans l'idéal, c'est près d'une vingtaine d'hectares qui doit être totalement inventoriée (Picard et Gourlet-Fleury, 2008), sous la forme de deux parcelles de 9 ha, ou de cinq parcelles de 4 ha. Il faut éviter les parcelles plus petites pour deux raisons principales : (ii) le coût de maintenance et (ii) leur inaptitude à capter l'effet de l'exploitation sélective telle que pratiquée en Afrique centrale (un arbre exploité en moyenne par hectare).

Fig. 2. *Installation (a) d'un sentier (©JL. Doucet) et (b) et d'une parcelle (©S. Gourlet-Fleury) en zone non exploitée*

Un pré-inventaire systématique des espèces commerciales sur les 400 ha permet de rationaliser la localisation des sentiers et des parcelles.

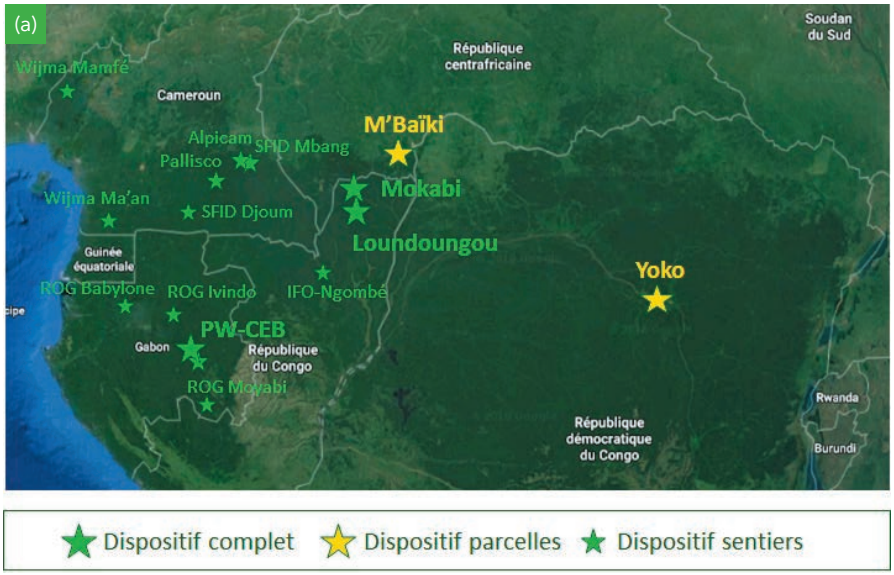
2.2 OÙ INSTALLER LES DISPOSITIFS ET COMBIEN ?

Pour distinguer et quantifier les effets de l'environnement, de l'exploitation, et de leur interaction sur la dynamique, le projet DynAfFor : (i) a choisi des sites écologiquement différents et n'ayant jamais été exploités auparavant ; (ii) les a suivis avant exploitation ; (iii) les a étudiés après exploitation.

Deux sites ont été retenus pour installer des dispositifs qualifiés de complets, c'est-à-dire regroupant des parcelles et des sentiers (Fig. 3). Ces sites sont localisés dans le nord du Congo, sur des substrats géologiques différents, dans des forêts n'ayant jamais été exploitées au sein de concessions forestières aménagées. Deux autres sites ont été intégrés dans le réseau en cours de constitution : (i) le site historique de M'Baïki, contenant un réseau de parcelles, et (ii) le site complet de Yoko en République Démocratique du Congo, installé en 2007-2009 mais dont seules les parcelles ont pu être suivies (Fig.3a). M'Baïki et Yoko couvrent d'autres substrats géologiques.

L'installation de dispositifs complets étant longue et coûteuse, il est difficile d'en créer beaucoup. Les compagnies forestières s'engagent plus facilement dans l'installation de sentiers, ciblés sur les espèces qui les intéressent. Au total, six sites portent ces sentiers (Fig. 3a). Quatre sentiers déjà installés au Cameroun ont intégré le réseau DynAfFor et huit autres ont été installés dans le cadre du projet, au Cameroun et au Gabon. En particulier, plusieurs de ces sentiers ont été installés par paire : un sentier dans une zone exploitée depuis peu, et le deuxième dans une zone exploitée depuis longtemps, ou non exploitée. Cette paire permet ainsi, en comparant les deux sentiers, de quantifier l'effet direct de l'exploitation. Par ailleurs, la comparaison entre ces sentiers et les sentiers des dispositifs complets permet d'estimer la représentativité de ces derniers et la possibilité d'extrapoler le grand nombre de connaissances qui y sont acquises (Fig. 3b).

Afin de faciliter la comparaison entre sites, une espèce commune non commerciale, a servi de référence. Il s'agit de Polyalthia suaveolens, tolérante à l'ombrage et présente en abondance dans tous les peuplements de la région. Une telle espèce est qualifiée de « phytomètre ».



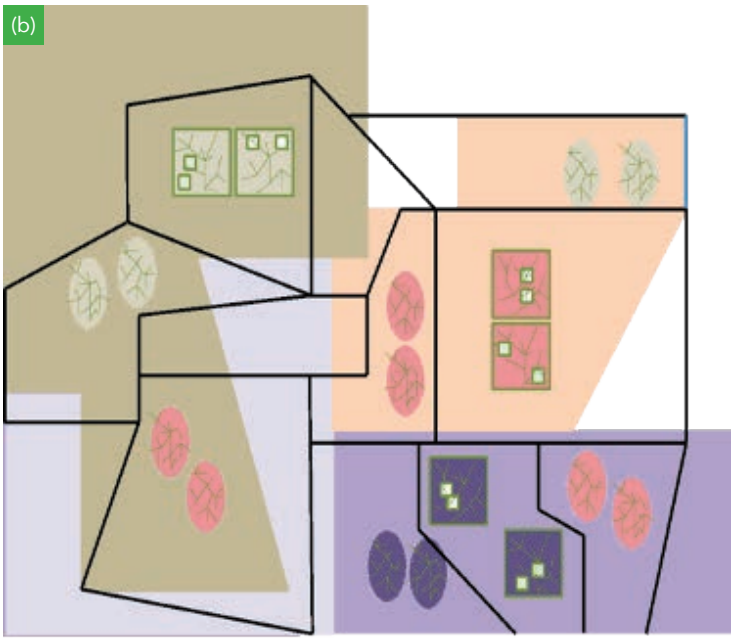


Fig. 3. *(a) Localisation des 10 sites contenant les dispositifs du réseau DynAfFor dans la région. Compagnies impliquées et/ou organismes impliqués : CIB-Olam (Loundoungou), Pallisco (Mindourou), Precious Woods-CEB (Bambidie), Rougier-SFID (Djoum, Mbang), Rougier (Mokabi), Wijma (Mamfé et Ma'an), SCAD/MEFCP/ICRA (M'Baïki), Université de Kisangani (Yoko). Les zones vert foncé correspondent aux forêts denses (carte Google Maps). (b) Schéma du dispositif en réseau DynAfFor : le réseau rassemble des sentiers (symbole en « arête de poisson ») et des dispositifs complets (deux blocs de 400 ha contenant des sentiers et des parcelles, symbolisés par des carrés) installés dans des concessions forestières (traits gras noirs représentant les limites) couvrant des conditions environnementales variables (couleurs différentes). Les couleurs localisées autour des sentiers et dans les dispositifs complets traduisent la similarité des processus de croissance et de mortalité observés : les comportements ne sont pas forcément homogènes au sein de zones présentant les mêmes conditions environnementales. La similarité observée permet d'extrapoler certaines informations acquises sur les dispositifs complets sur de plus grandes superficies*

2.3 PENDANT COMBIEN DE TEMPS ET À QUELLE FRÉQUENCE FAUDRAIT-IL LES SUIVRE ?

Pour compenser la faible densité de population de certaines espèces, deux options sont possibles : (i) augmenter considérablement les superficies inventoriées, (ii) suivre les arbres rencontrés sur une superficie acceptable, soit 400 ha, pendant au moins la durée d'une rotation : le grand nombre d'années compense en partie le faible nombre d'arbres.

La fréquence idéale de suivi des dispositifs est annuelle pour trois raisons principales : (i) pérenniser une équipe expérimentée, dédiée à ce type de travail et le pratiquant régulièrement ; (ii) étudier les relations entre les processus de la dynamique et les caractéristiques climatiques annuelles, très variables d'une année à l'autre ; (iii) entretenir les marques de peinture sur les troncs : numéros, emplacement du ruban de mesure. Une bonne partie de ces marques disparaît rapidement, et la perte est complète en une dizaine d'années.

3. L'INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET HISTORIQUES SUR LA STRUCTURE ET LA DIVERSITÉ DES FORÊTS

Pour atteindre les objectifs du projet DynAfFor, une série d'activités se sont appuyées sur les dispositifs existants ou créés par le projet. Dans un premier temps, les conditions environnementales ont été caractérisées. Ensuite, leur influence sur la structure et la composition des forêts ont été analysées. Cela a permis de répondre aux questions suivantes :

- Le réseau DynAfFor est-il représentatif de l'hétérogénéité des forêts d'Afrique centrale ?
- Quels sont les facteurs qui peuvent expliquer cette hétérogénéité ?
- Quelles en sont les conséquences en termes de structure, de biomasse, de composition et de diversité ?

3.1 UN RÉSEAU DYNAFFOR PARTIELLEMENT REPRÉSENTATIF DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DES FORÊTS D'AFRIQUE CENTRALE

La localisation des nouveaux dispositifs complets de DynAfFor s'est appuyée sur les résultats du projet CoForChange (http://coforchange.cirad.fr/) qui ont abouti à la caractérisation des forêts du nord du Congo, du sud-ouest de la RCA et du sud-est du Cameroun (Fayolle et al., 2014). L'étude de la composition floristique de ces forêts a été poursuivie à l'échelle de toute l'Afrique centrale dans le cadre d'un autre projet (CoForTips : https://www.cofortips.org/) en valorisant les données d'inventaire d'aménagement de 113 concessions forestières dans toute la région (soit près de 200 000 placettes de 0,5 ha réparties dans les 5 pays). Ces dispositifs ont également permis de réaliser des recherches complémentaires sur la taxonomie des essences exploitées ainsi que sur leur mode de reproduction à l'aide d'outils de génétique moléculaire dans le cadre du projet AFRITIMB.

L'utilisation de méthodes statistiques avancées permettant d'étudier les relations entre la distribution spatiale des espèces et une série de variables environnementales et anthropiques a permis de distinguer 10 grands types de forêt dans la région (Fig. 4). Ces types se distinguent à la fois par leur composition floristique et par leur composition fonctionnelle[5], certains types pouvant être floristiquement proches mais fonctionnellement différents (exemple des forêts suivies sur les sites de Loundoungou et de Mokabi), ou floristiquement éloignés mais proches fonctionnellement (exemple des forêts présentes au centre du Gabon et de la RDC).

5. Composition floristique : liste et abondance relative des espèces présentes dans un peuplement. Composition fonctionnelle : liste et abondance relative de groupes d'espèces présentant des caractéristiques semblables, comme par exemple leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, ou leur capacité à croître et/ou survivre sous une faible intensité lumineuse ou en disposant de réserve en eau limitée.

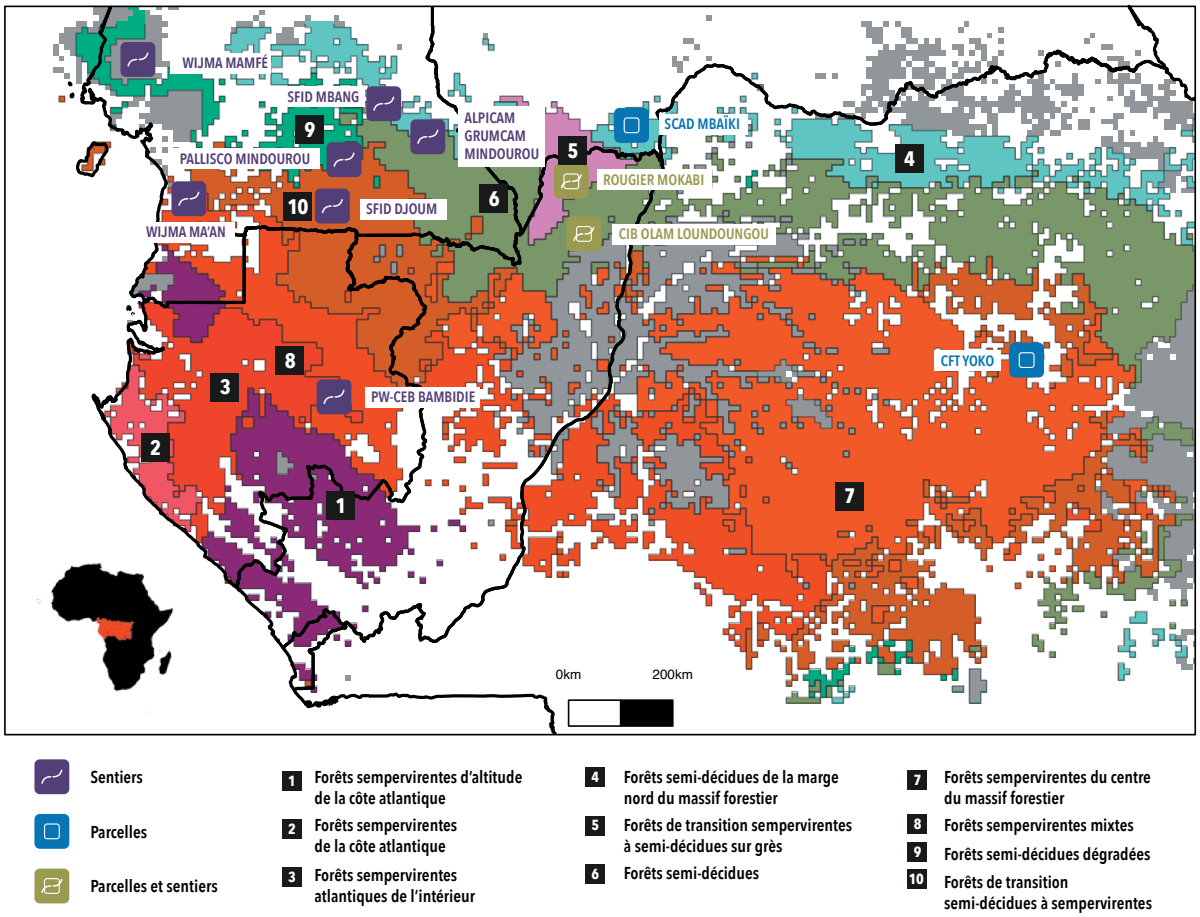


Fig. 4. *(Les grands types forestiers d'Afrique centrale (Réjou-Méchain et al., 2021). (1) Forêts sempervirentes d'altitude de la côte atlantique ; (2) forêts sempervirentes de la côte atlantique ; (3) forêts sempervirentes atlantiques de l'intérieur ; (4) forêts semi-décidues de la marge nord du massif forestier ; (5) forêts de transition sempervirentes à semi-décidues sur grès ; (6) forêts semi-décidues ; (7) forêts sempervirentes du centre du massif forestier; (8) forêts sempervirentes mixtes ; (9) forêts semi-décidues dégradées ; (10) forêts de transition semi-décidues à sempervirentes. Les étoiles localisent les 10 sites contenant des dispositifs du réseau DynAfFor : complets et parcelles (grandes étoiles), sentiers (petites étoiles), voir Fig. 3a.*

Le substrat géologique joue un rôle déterminant sur le type de forêt, notamment sur la composition des forêts de transition sur grès de Carnot (type 5). Le climat a aussi un rôle important (Philippon et al., 2019, Réjou-Méchain et al., 2021), en expliquant le caractère sempervirent de la plupart des forêts du Gabon et du sud-ouest du Cameroun (types 1, 2 et 3), mais aussi du centre et du sud de la République Démocratique du Congo (type 7). Dans les premières, l'irradiance journalière est fortement limitée par le couvert nuageux durant les saisons sèches, lequel limite le déficit hydrique. Dans les secondes, l'irradiance journalière élevée est accompagnée d'une forte pluviométrie, limitant également le déficit hydrique. Enfin, l'influence anthropique sur la composition floristique est localement importante (type 9).

La superposition du réseau DynAfFor à la carte des grands types forestiers (Fig. 4) montre que les types 4, 5, 6, 8, 10 disposent maintenant d'un dispositif de suivi de la dynamique et de l'effet de l'exploitation forestière. Mais cette représentation illustre aussi les efforts qu'il reste à faire, en particulier dans les forêts sempervirentes atlantiques de la côte et de l'intérieur (types 1, 2, 3), les forêts sempervirentes du centre (type 7) et la partie sud-est des forêts sempervirentes mixtes (type 8) et de transition semi-décidues à sempervirentes (type 10). Elle montre également à quel point il est difficile d'évaluer la variabilité du comportement des espèces au sein de chacun des types, étant donné le petit nombre de dispositifs suivis.

3.2 DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET HISTORIQUES VARIABLES AU SEIN DU RÉSEAU DYNAFFOR

Afin de comprendre l'influence du substrat géologique sur la répartition des types forestiers et donc sur la dynamique forestière, le projet DynAfFor a installé des dispositifs complets dans une zone a priori climatiquement homogène mais sur des substrats aussi différents que possible, en faisant l'hypothèse que cette différence se traduirait également sur les caractéristiques des sols.

3.2.1 Des facteurs environnementaux et historiques variables au sein du réseau DynAfFor

Afin de démêler l'effet du sol et du climat sur la dynamique forestière, il était nécessaire de pouvoir caractériser précisément le climat. Il existe peu de stations météorologiques installées à proximité des dispositifs, et ces stations sont souvent limitées en capteurs : des pluviomètres la plupart du temps. Par ailleurs, les données climatiques provenant des satellites sont fortement biaisées et peu fiables à l'échelle locale. En conséquence, pour disposer de données fiables, deux stations Campbell CR1000 ont été installées dans les sites hébergeant les dispositifs complets du Congo : au sud du site de Loundoungou (à Pokola, chez CIB-Olam, Fig. 5) et au nord du site de Mokabi (à Lola, chez Mokabi SA) en février-mars 2016. Ces stations mesurent toutes les 15 minutes les précipitations, la température, le rayonnement solaire global incident, la pression atmosphérique, la vitesse du vent et sa direction. Les données sont transmises régulièrement par satellite.

La synthèse des données acquises met en évidence certaines caractéristiques climatiques similaires, alors que d'autres distinguent clairement les deux sites. La pluviométrie moyenne annuelle (1500 mm) et le nombre moyen annuel de jours de pluie (100 jours) sont comparables, de même que la fréquence des évènements pluvieux de plusieurs types . Mais le régime des pluies diffère entre les deux sites : il est bimodal à Pokola (grande saison sèche de décembre à février, petite saison sèche de juillet à août) et quasi-unimodal à Lola (grande saison sèche de décembre à février).

Fig. 5. *Station météorologique de Pokola (© A. Mariscal)*

6. Les évènements pluvieux sont de plusieurs types, et leur fréquence est comparable entre les deux sites : 92 % de ces événements sont très soudains et brefs (< 1h) et peu intenses (< 16 mm/h) et apportent 44 % du total précipité. Les événements longs (> 1 heure) et dont l'intensité s'accentue au cours de la 1ère heure (> 24 mm/h), ne représentent que 8 % mais apportent 54 % du cumul total précipité. Certaines années, comme 2018, sont caractérisées par un plus faible nombre total d'évènements, mais davantage d'évènements longs et intenses.

Le rayonnement solaire est bimodal à Pokola et à Lola, avec un pic au moment des saisons des pluies (avril et octobre). Ce phénomène est une caractéristique unique du massif forestier d'Afrique centrale puisque, sous les tropiques, les saisons des pluies correspondent généralement aux minima de rayonnement solaire incident. Le minimum est, lui, observé en juillet, saison sèche secondaire bien marquée à Pokola et beaucoup moins à Lola. Le rayonnement solaire est plus intense en grande saison sèche à Lola qu'à Pokola, ce qui implique que la demande en eau de la forêt y est plus élevée. Durant cette saison, la température est également plus fraîche à Lola qu'à Pokola. Par ailleurs, les variations saisonnières et diurnes de température et d'humidité relative observées à Lola sont particulières, et pourraient indiquer l'existence d'un phénomène similaire à l'Harmattan, susceptible également d'augmenter le stress hydrique en forêt.

3.2.2 Des sols variant globalement en fonction du substrat géologique… et des termitières

Les 16 sols choisis comme référence sur les 10 sites du réseau DynAfFor présentent une grande variabilité de texture qui reflète la diversité du substrat géologique. Les sols de Djoum, Mbang, Mindourou et Ma'an, tous situés au sud du Cameroun sur gneiss ou micaschistes, sont les plus argileux (40 à 70 % d'argile) tandis que ceux de Yoko, sur alluvions d'origine gréseuse, sont les moins argileux (15 % d'argile) et en parallèle les plus sableux. Les sols de Bambidie, Mamfé, Mbaïki, Loundoungou, et Mokabi, situés respectivement sur des roches volcano-sédimentaires, métamorphiques (migmatites-gneiss), grès-quartzites, alluvions et grès, ont des textures intermédiaires. Au sein d'un site, la texture des sols varie aussi en fonction de la topographie, plus particulièrement sur les sites de Mindourou, Bambidie et Loundoungou.

Cette variabilité de texture se traduit par une variabilité de la plupart des éléments chimiques du sol. Les sols les plus argileux contiennent les plus fortes teneurs en phosphore total et en **bases échangeables**, en particulier le calcium. Par contre, ils contiennent très peu de phosphore disponible, au contraire des sols les plus sableux de Yoko.

En perspective, l'utilisation d'une carte géomorphologique de l'Afrique centrale (*accepted in African Journal of Soil Science», cf. la légende de la Fig.6).* devrait permettre de mieux prédire les propriétés des sols à l'échelle régionale.

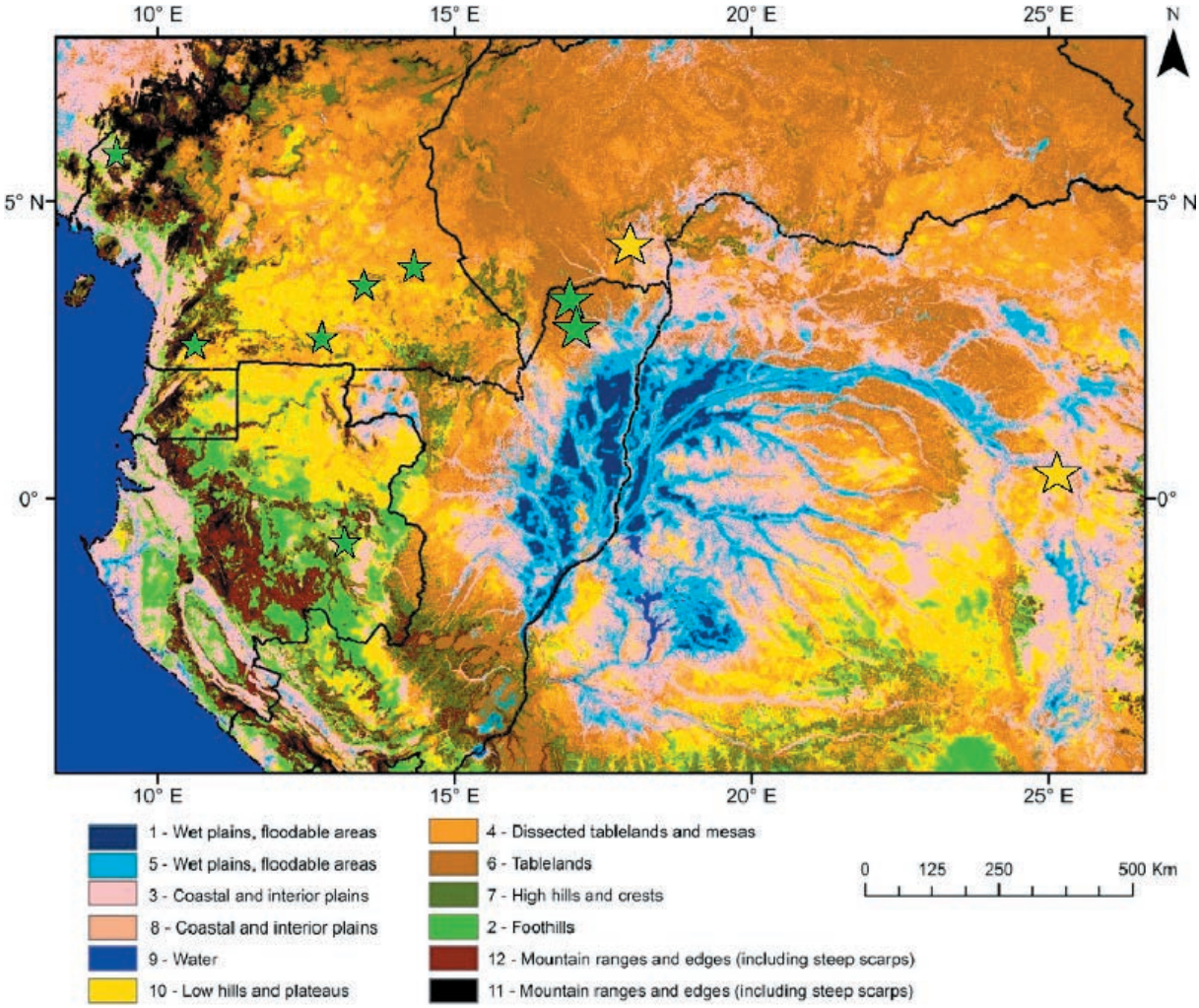


Fig. 6. *Les grandes unités géomorphologiques d'Afrique centrale (Viennois et al., accepted in African Journal of Soil Science). (1, 5) Plaines inondables ; (3, 8) plaines côtières et intérieures ; (9) eau ; (10) collines et plateaux de faible altitude ; (4) plateaux découpés et cuirassés ; (6) plateaux ; (7) collines hautes et crêtes ; (2) collines de piedmont ; (12, 11) montagnes. Les étoiles localisent les 10 sites contenant des dispositifs du réseau DynAfFor : complets et parcelles (grandes étoiles), sentiers (petites étoiles), voir Fig. 3a.*

Les propriétés des sols peuvent aussi varier localement en fonction de la présence de termitières épigées. Cette découverte inattendue a été faite sur le site de Loundoungou. Les termitières, présentes à une densité moyenne de 2,2/ha, atteignent en moyenne 4 m de hauteur et 20 m de diamètre (Fig. 7). Construites par les termites du genre *Macrotermes*, elles sont plus riches en argile et en bases échangeables que les sols témoins (Lenz, 2018). Elles pourraient expliquer la présence de certaines espèces d'arbres, notamment de la famille des Méliacées. Les sites de Mindourou et de Mokabi abritent également des termitières de *Macrotermes*, mais leurs dimensions sont plus modestes : 2 m de hauteur et 2 m de diamètre en moyenne. Les autres sites du réseau DynAfFor n'abritent pas de termitières de ce genre, et des études plus précises sur leur extension géographique en zone forestière, et les facteurs explicatifs de leur abondance et de leur taille mériteraient d'être réalisées.

Fig. 7. *Termitière épigée géante construite par le genre Macrotermes sur le site de Loundoungou, au nord du Congo (© V.Freycon)*

3.2.3 Une influence anthropique avérée

Dans le cadre du projet CoForChange, un certain nombre de données paléoécologiques et anthracologiques[7] (Fig. 8) ont été collectées au nord du Congo et dans le sud-est du Cameroun (Morin-Rivat et al., 2014), confirmant l'histoire mouvementée de ces forêts, qui ont été jardinées par les populations humaines de la région. Plusieurs espèces héliophiles[8] dominant la canopée des forêts d'Afrique centrale, et pour certaines d'une grande importance commerciale (l'Ayous, l'Afrormosia, le Fraké, le Tali[9]), présentent aujourd'hui des structures de populations particulières, avec beaucoup d'arbres de taille moyenne, et peu d'arbres de petite taille, traduisant un déficit de régénération.

Fig. 8. *Les tessons de poteries trouvés dans le sol du dispositif de Mbang témoignent de présences humaines anciennes (© JL. Doucet)*

7. Données paléoécologiques et anthracologiques : données provenant généralemen de l'analyse des charbons de bois issus du bois de feu et recueillis dans un gisement archéologique permettant d'avoir une information sur la végétation et le mode de vie passés.

8. Espèces héliophiles : les arbres appartenant à ces espèces ont besoin d'une intensité lumineuses élevée, dès le stade juvénile, pour croître en hauteur et en diamètre. Les espèces pionnières ont, elles, besoin d'une intensité lumineuse très élevée pour croître, dès le stade de la graine, mais aussi pour survivre à tous les stades de leur développement. Les espèces tolérantes à l'ombrage, en revanche, peuvent croître et survivre dans des conditions de faible intensité lumineuse.

9. Voir les noms latins correspondant aux noms vernaculaires, en annexe de ce document.

L'estimation de l'âge des arbres grâce aux données de croissance des sentiers DynAfFor du Cameroun a permis de mettre en évidence que l'apparition de ce déficit de régénération correspond globalement à la colonisation de la région par les Européens (Morin-Rivat et al., 2017). L'hypothèse est que ces espèces héliophiles se régénéraient correctement avant la colonisation, notamment dans les jachères faisant suite à l'agriculture sur brûlis. L'économie coloniale ayant perturbé les activités humaines dans la région, en rapatriant les populations le long des voies de communication, a affecté la dynamique de ces espèces indicatrices des forêts secondarisées, qui dominent aujourd'hui les canopées. Des évènements similaires se sont produits en Amazonie (Levis et al., 2017). Les forêts denses humides d'Afrique centrale contiennent donc aujourd'hui des densités appréciables d'espèces exploitables (les espèces citées plus haut mais également l'Okoumé, le Sapelli, l'Iroko, l'Okan, …) du fait de l'anthropisation de ces milieux au cours des siècles précédents. L'impact de l'action de l'homme sur la forêt, lorsqu'elle est contrôlée, n'est donc pas toujours négatif. En l'occurrence, elle a contribué à la forte valeur économique actuelle de ces milieux. Un tel modèle d'enrichissement forestier devrait être intégré dans les réflexions de gestion durable des forêts tropicales.

3.3 DES FORÊTS DONT LA STRUCTURE, LA BIOMASSE ET LA DIVERSITÉ VARIENT ENTRE LES SITES

Une fois les facteurs environnementaux et historiques analysés, le projet DynAfFor a examiné leur influence sur la structure et la diversité des forêts. Il a aussi étudié comment améliorer les estimations de biomasse et de richesse spécifique.

3.3.1 Les facteurs influençant la structure et la biomasse

Le nombre, la surface terrière et le stock local de biomasse aérienne des arbres présents dans les forêts « intactes » (c'est-à-dire non exploitées) d'Afrique centrale sont très variables, comme l'a montrée la synthèse réalisée par Lewis et al. (2013). Les quatre dispositifs complets et les parcelles du réseau DynAfFor couvrent à eux seuls l'essentiel de cette variabilité (Fig. 9) : de 323 à 674 arbres.ha-^{1}, de 27,1 à 41,2 m^{2}.ha-^{1} et de 402 à 526 Mg.ha-^{1}.

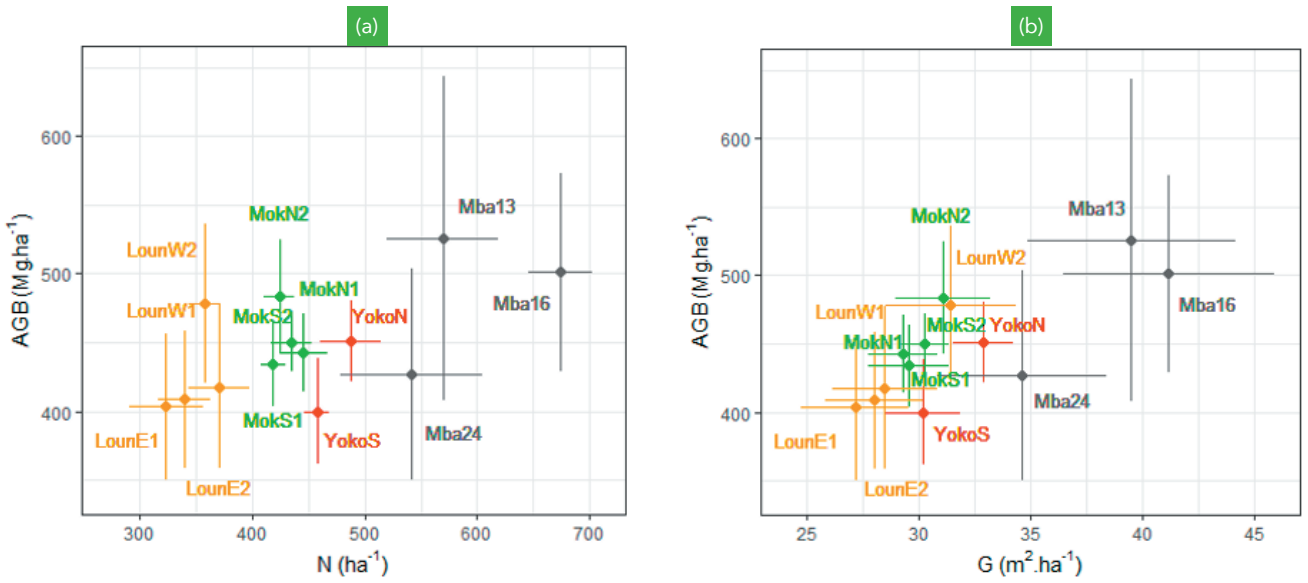


Fig. 9. *Structure et biomasse des parcelles témoins du réseau DynAfFor en 2018. Relation (a) entre le nombre d'arbres et la biomasse aérienne, (b) entre la surface terrière et la biomasse aérienne des arbres de DHP ≥ 10 cm sur les quatre sites du réseau. Orange : site de Loundoungou (nord du Congo, 4 parcelles de 9 ha), vert : site de Mokabi (nord du Congo, 4 parcelles de 9 ha), rouge : site de Yoko (RDC, 2 parcelles de 9 ha), noir : site de M'Baïki (RCA, 3 parcelles témoin de 4 ha). Les intervalles de confiance à 95 % sont ceux de la moyenne de chaque variable (calculés en utilisant la loi de Student), ils illustrent la grande variabilité existant également à l'échelle de l'hectare dans les parcelles (voir Loubota Panzou et al., 2018).*

Des facteurs environnementaux avaient été identifiés en 2013 par Lewis et ses co-auteurs pour expliquer ces différences : certaines caractéristiques physiques et chimiques des sols (effet positif des teneurs en argile et en phosphore, effet négatif du ratio C:N et de la somme des bases échangeables) et certaines caractéristiques climatiques des sites étudiés (effet positif de la quantité de pluie cumulée au cours des 9 mois les plus secs, effet négatif des 3 mois les plus humides et de la température moyenne annuelle). **D'une manière générale, les relations observées sur les sites de DynAfFor correspondent peu à ces résultats** : si cela peut s'expliquer pour le climat, étant donné que les dispositifs ont été installés dans des conditions aussi semblables que possible, c'est plus étonnant pour les sols, choisis sur les substrats les plus différents possibles. Ces résultats illustrent la faible puissance explicative de ces facteurs. Ils montrent également, grâce au site de Loundoungou, l'existence d'un autre facteur explicatif inattendu, la présence importante de Marantacées[10] dans le sous-bois (Fig. 10) : ces Marantacées freinent la régénération des espèces ligneuses et peuvent expliquer, à elles seules, la faiblesse des effectifs, de la surface terrière et de la biomasse présentes sur le site.

10. Marantacées : famille de plantes herbacées de grande taille se développant dans le sous-bois ou en périphérie des forêts tropicales et subtropicales. Certaines sont lianescentes.

Fig. 10. *Vues sur la végétation présente à différents endroits du dispositif de Loundoungou. La Marantacée grimpante Haumannia dankelmaniana est très abondante et limite en partie la régénération du peuplement (© S. Gourlet-Fleury).*

Le calcul de la biomasse sur des parcelles est, le plus souvent, effectué à partir d'une équation allométrique[11] prédisant la biomasse aérienne en fonction du diamètre de l'arbre, de sa hauteur totale (quand la donnée est disponible) et de la densité du bois (moyenne pour l'espèce) (Fig.11). Un consensus existe aujourd'hui sur la bonne performance des modèles allométriques pantropicaux (Chave et al., 2014 ; Fayolle et al., 2018), incluant les données de diamètre des inventaires, des hauteurs prédites par un modèle local reliant la hauteur au diamètre, et les valeurs de densité du bois à l'échelle de l'espèce, du genre, ou du site. Sur les dispositifs du nord du Congo, les allométries locales hauteur-diamètre sont différentes entre les sites de Loundoungou (arbres plus hauts pour un même diamètre) et de Mokabi (Loubota Panzou et al., 2018). Mais à Mokabi, les espèces ont des densités de bois plus importantes pour deux raisons : (i) elles se développent sur des sols sableux très pauvres et filtrant, sélectionnant des espèces plus résistantes à ces conditions (Gourlet-Fleury et al., 2011) ; (ii) la forêt est plus ancienne sur ce site. Des arbres plus hauts à Loundoungou, et plus denses à Mokabi se traduisent finalement par une quantité de biomasse à l'hectare comparable entre ces sites.

11. Equation allométrique : équation mathématique mettant en relation différentes caractéristiques, généralement morphologiques, d'un organisme.

Fig. 11. *Exemple d'arbre bien visible permettant des mesures plus précises de sa hauteur totale, mais aussi des dimensions de son houppier, afin de les mettre en relation avec son diamètre (site de Pallisco, © JL. Doucet)*

D'autres caractéristiques changent entre les sites, en particulier la dimension des houppiers (Fig.11). Ce résultat a d'importantes conséquences pratiques pour les nouvelles méthodes d'inventaire forestier basées sur l'utilisation de drones, notamment quand il s'agira de convertir des dimensions de houppiers estimées à partir d'images aériennes en diamètre, en volume ou directement en biomasse. Il faudra en effet utiliser des relations allométriques spécifiques au site pour les différentes conversions : houppier-diamètre, houppier-volume, houppier-biomasse.

3.3.2 L'importance des arbres à tronc déformé, des petits arbres et des arbres morts dans l'estimation de la biomasse

Le calcul de la biomasse des peuplements s'effectue généralement sans tenir compte de facteurs potentiellement importants : (i) la forte irrégularité du tronc de certains arbres, (ii) des arbres de diamètre inférieur au diamètre de précomptage (diamètre à partir duquel sont réalisés les inventaires, en général 10 cm DHP), et (iii) des arbres morts. Le projet DynAfFor s'est intéressé à ces différents sujets.

Quelles erreurs fait-on lorsque l'on déplace les mesures du diamètre suite aux irrégularités du tronc ?

Le diamètre des arbres n'est pas toujours mesurable à la hauteur standard de 1,30 m avec un mètre ruban, car le tronc peut présenter des déformations. La hauteur de mesure est alors remontée pour atteindre une partie circulaire du tronc, au-delà de 4,50 m dans le cas de grands contreforts. Cette variabilité dans la hauteur de mesure engendre une certaine erreur, voire des biais dans les estimations de la surface terrière et de la biomasse. Grâce à de nouvelles techniques, il est aujourd'hui possible de mesurer précisément la surface terrière à 1,30 m de ces troncs irréguliers et ce, à partir d'images acquises tout autour du tronc (photogrammétrie terrestre, Bauwens et al., 2017, ou technologie du LiDAR terrestre). La reconstitution du tronc obtenue en trois dimensions permet en effet d'extraire sa section à n'importe quelle hauteur. La mise en œuvre de ces techniques reste cependant assez lourde et donc difficilement envisageable lors des campagnes régulières de mesure des arbres dans les parcelles permanentes. Le développement d'un modèle général de défilement[12] à partir de mesures 3D d'arbres échantillons est donc proposé pour harmoniser la hauteur de mesure de tous les arbres d'une parcelle permanente (Fig. 12).

L'utilisation de ce type de modèle permet d'atteindre une précision de 4 % sur l'estimation du diamètre à 1,30 m. L'information « espèce » dans le modèle joue peu, la variabilité observée entre individus d'une même espèce, et entre sites, étant bien plus importante que la variabilité spécifique.

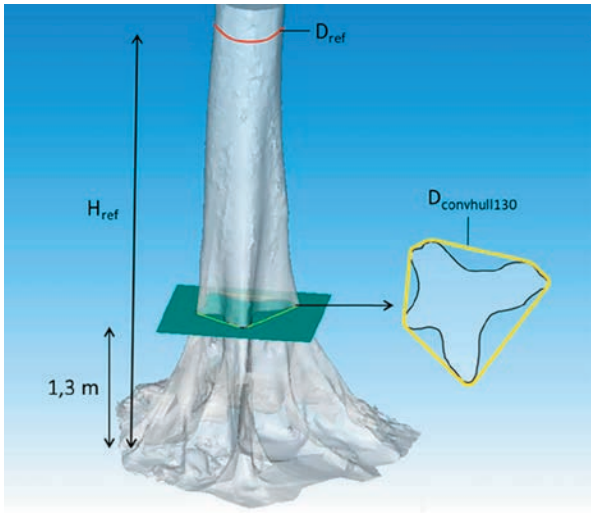


Fig. 12. *Illustration des variables utilisées pour évaluer le diamètre à 1,30 m d'un arbre à tronc déformé. Un modèle général de défilement du type :*

$$D_i = \frac{D_{ref}\, h_i{}^a}{H_{ref}{}^a}$$

a été calibré, avec Di : diamètre d'un cercle de la même surface que la section réelle du tronc à la hauteur hi, Dref : diamètre mesuré au-dessus des contreforts et Href : hauteur de mesure du diamètre Dref. Le paramètre de défilement a est estimé à partir de variables qui comprennent la mesure du diamètre d'un cercle de longueur égale au périmètre de l'enveloppe convexe à 1,3 m (DconvHull130). D'après Bauwens et al. (in Ecological Applications).

12. Défilement : caractérise la conicité du tronc, c'est-à-dire la décroissance en diamètre depuis la base du tronc jusqu'à son sommet (ou "décroissance métrique moyenne").

L'application de ce modèle sur le dispositif de Loundoungou a permis d'évaluer le biais généré par la remontée des mesures de diamètre sur les stocks de biomasse sur pied. Parmi les huit carrés de 1 ha sélectionnés au hasard dans les parcelles, nous avons constaté que la **biomasse peut être sous-estimée de 15 % par rapport à la biomasse estimée avec des diamètres corrigés par le modèle de défilement. Ce biais devient significatif lorsque la proportion d'arbres dont la hauteur de mesure est supérieure à 1,30 m dépasse 10 à 15 % de l'effectif total.**

L'absence d'harmonisation de la hauteur sur les estimations de la variation du stock de biomasse au cours du temps amène quant à lui un biais qui peut aller jusqu'à 5 % sur une parcelle de 1 ha. Ce biais est cependant très variable en fonction de la parcelle mesurée, et ne s'est pas avéré significatif sur l'ensemble des 8 ha testés.

Que représente la biomasse des arbres de diamètre inférieur au diamètre de précomptage, et celle des arbres morts ?

La biomasse de la forêt est, la plupart du temps, estimée à partir d'inventaires standards centrés sur les arbres de DHP ≥ 10 cm, même si la logique voudrait que toute la matière organique vivante comme morte soit intégrée dans ces estimations.

Pour compléter les inventaires standards, deux travaux ont été réalisés sur le site de Loundoungou, l'un sur la biomasse des ligneux présents dans la classe de DHP [1 cm - 10 cm[(soit environ 5000 tiges.ha-^{1}, représentant 13 Mg.ha-^{1}) (Fofana, 2018), l'autre sur la biomasse des arbres morts faisant plus de 10 cm à la base des troncs (représentant 50,2 Mg.ha-^{1} dont environ 35 % encore debout) (Kouassi, 2018).

La biomasse moyenne des arbres vivants ≥ 10 cm DHP, étant de 432,6 Mg.ha-^{1}, la biomasse aérienne totale sur le site est donc au minimum de 495,8 Mg.ha-^{1}. Les pourcentages respectifs représentés par les trois compartiments (ligneux entre 1 et 10 cm, biomasse des arbres morts de plus de 10 cm de diamètre, arbres vivants) sont de 2,6 %, 10,2 % et 87,2 %. En tenant compte de tous les éléments non mesurés (arbres et arbustes de diamètre inférieur à 1 cm et débris ligneux de diamètre inférieur à 10 cm), la biomasse aérienne totale dépasse probablement 500 Mg.ha-^{1}.

Les valeurs mesurées sur l'ensemble des parcelles montrent une très forte variabilité spatiale, et une absence de corrélation entre les différents compartiments. Peu de travaux ont été réalisés sur ce sujet en Afrique centrale, et ils présentent des résultats très variables (Carlson et al., 2017).

3.3.3 Des compositions floristiques très différentes, une richesse et une diversité élevées

Au total, 240 espèces ont été inventoriées sur les parcelles de Loundoungou (36 ha) et 230 sur les parcelles de Mokabi (36 ha) (Forni et al., 2019). Les trois parcelles témoins de M'Baïki (12 ha) abritent 304 espèces et les deux parcelles de Yoko (18 ha) en abritent 222. Chacun de ces quatre sites est localisé dans un type forestier différent en terme de composition floristique (Fig. 4) : Loundoungou dans les forêts semi-décidues (type 6), Mokabi dans les forêts de transition sempervirentes à semi-décidues sur grès (type 5), M'Baïki dans les forêts semi-décidues de la marge nord du massif forestier (type 4), Yoko dans les forêts de transition semi-décidues à sempervirentes.
Les différences floristiques observées entre les sites sont marquées. Une analyse non symétrique des correspondances[13] réalisée sur les 13 parcelles concernées illustre ces différences (Fig. 13).

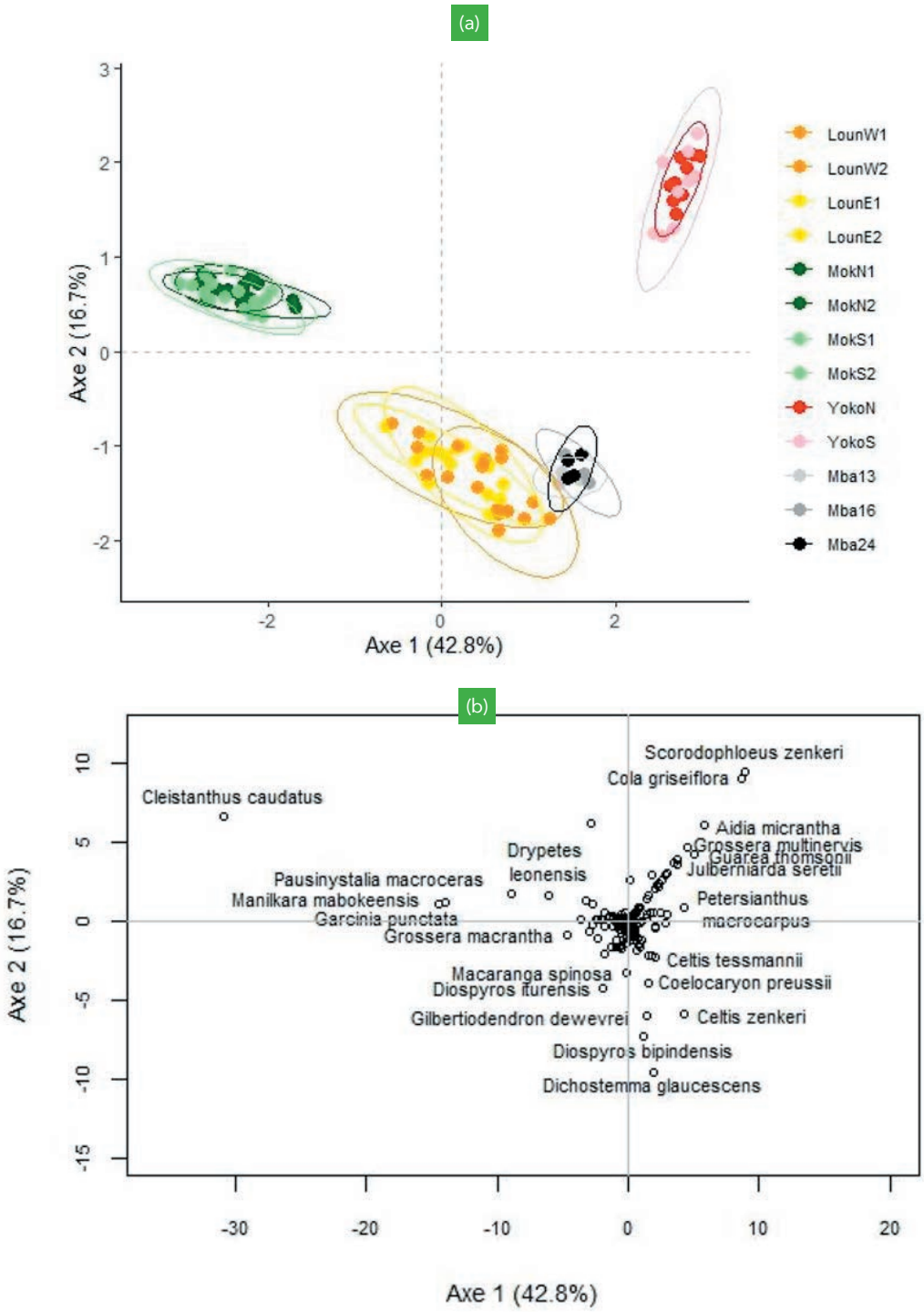


Fig. 13. *Analyse non symétrique des correspondances sur les 13 parcelles non exploitées du réseau DynAfFor (données de 2018). Représentation, sur le premier plan factoriel (a) de chaque carré de 1 ha appartenant aux différents parcelles ; (b) des espèces tirant principalement les axes de l'analyse et différenciant particulièrement les sites.*

Les sites de Mokabi et de Yoko diffèrent nettement entre eux, et diffèrent nettement des deux sites de M'Baïki et de Loundoungou qui, eux, sont floristiquement les plus proches. Les différences observées peuvent s'expliquer par la distance (le site de Yoko est celui qui partage le moins grand nombre d'espèces avec les autres sites), mais aussi par le type de substrat géologique et le stade d'évolution du peuplement : les espèces présentes à Mokabi sont davantage sempervirentes et possèdent un bois plus dense que les espèces présentes à Loundoungou et

à M'Baïki. Sur ces deux sites, les forêts se situent sur des sols plus riches, et se trouvent à un stade moins avancé du cycle sylvigénétique que celles de Mokabi.

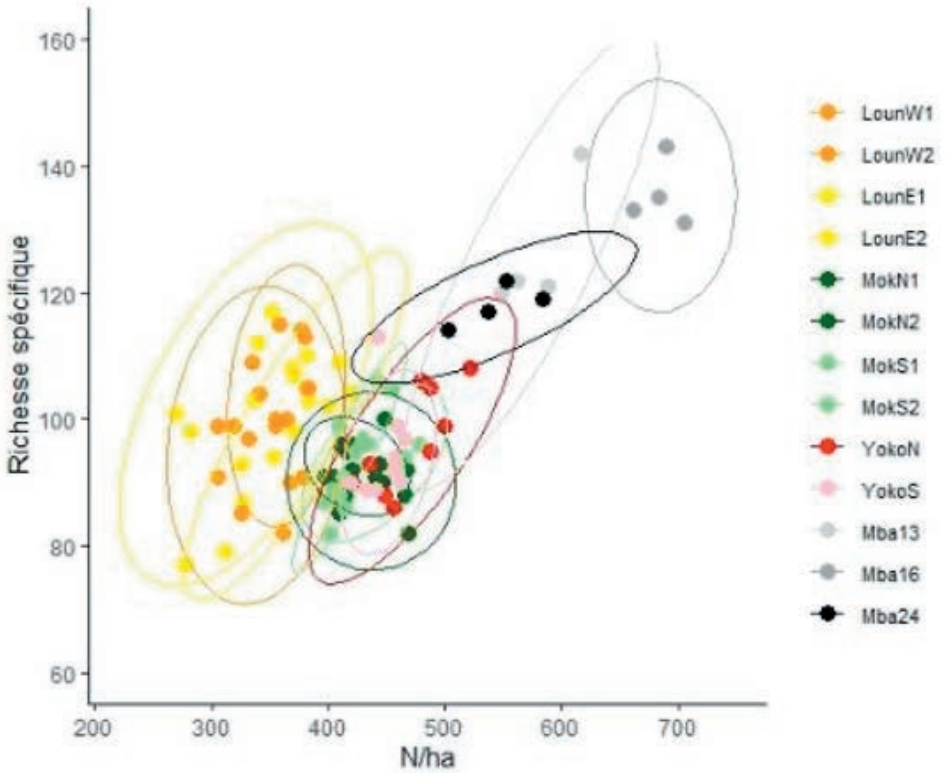
Le nombre d'espèces présentes, et la diversité des peuplements, dépendent de la superficie couverte par les inventaires. Pour comparer les sites, il faut donc travailler sur des effectifs comparables et sur des superficies identiques. Sur chaque hectare, le nombre total d'espèces présentes est comparable à Loundoungou, Mokabi et Yoko, mais nettement plus élevé à M'Baïki (Fig. 14a) : une relation positive apparaît entre la richesse et la densité d'arbres présents. Tirer au hasard un effectif fixe d'arbres sur chaque hectare permet de tenir compte des différences de densité : le calcul de la richesse, appelée indice de raréfaction[14], montre que le nombre d'espèces présentes est très comparable à Loundoungou et à M'Baïki, et un peu plus faible à Mokabi et à Yoko (Fig. 14b). La diversité spécifique (ici l'indice de Shannon[15]), qui combine l'information sur le nombre d'espèces présentes et sur la répartition des arbres au sein de ces espèces, montre également des valeurs comparables à Loundoungou et à M'Baïki, plus faibles à Mokabi, et intermédiaires à Yoko (Fig. 14c). Ces indices positionnent les sites de M'Baïki et de Loundoungou dans la partie plutôt riche des forêts de plaine d'Afrique centrale et de l'Ouest.

13. Analyse non symétrique des correspondances : cette analyse diffère de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) classique, utilisée pour analyser une table de contingence espèces x sites, en attribuant davantage de poids aux espèces abondantes, et moins de poids aux espèces rares.

14. Indice de raréfaction : nombre d'espèces présentes dans un échantillon d'arbres dont l'effectif est fixé. Il permet de comparer rigoureusement la richesse floristique de peuplements dont la densité d'arbres varie.

15. Indice de Shannon : indice quantifiant la diversité d'un peuplement en combinant sa richesse (le nombre d'espèces présentes) et la répartition des arbres au sein des différentes espèces : un peuplement constitué de 20 arbres, répartis équitablement entre deux espèces, est plus divers qu'un peuplement constitué de 20 arbres dont 15 appartiennent à la première, et 5 à la deuxième.

(a)



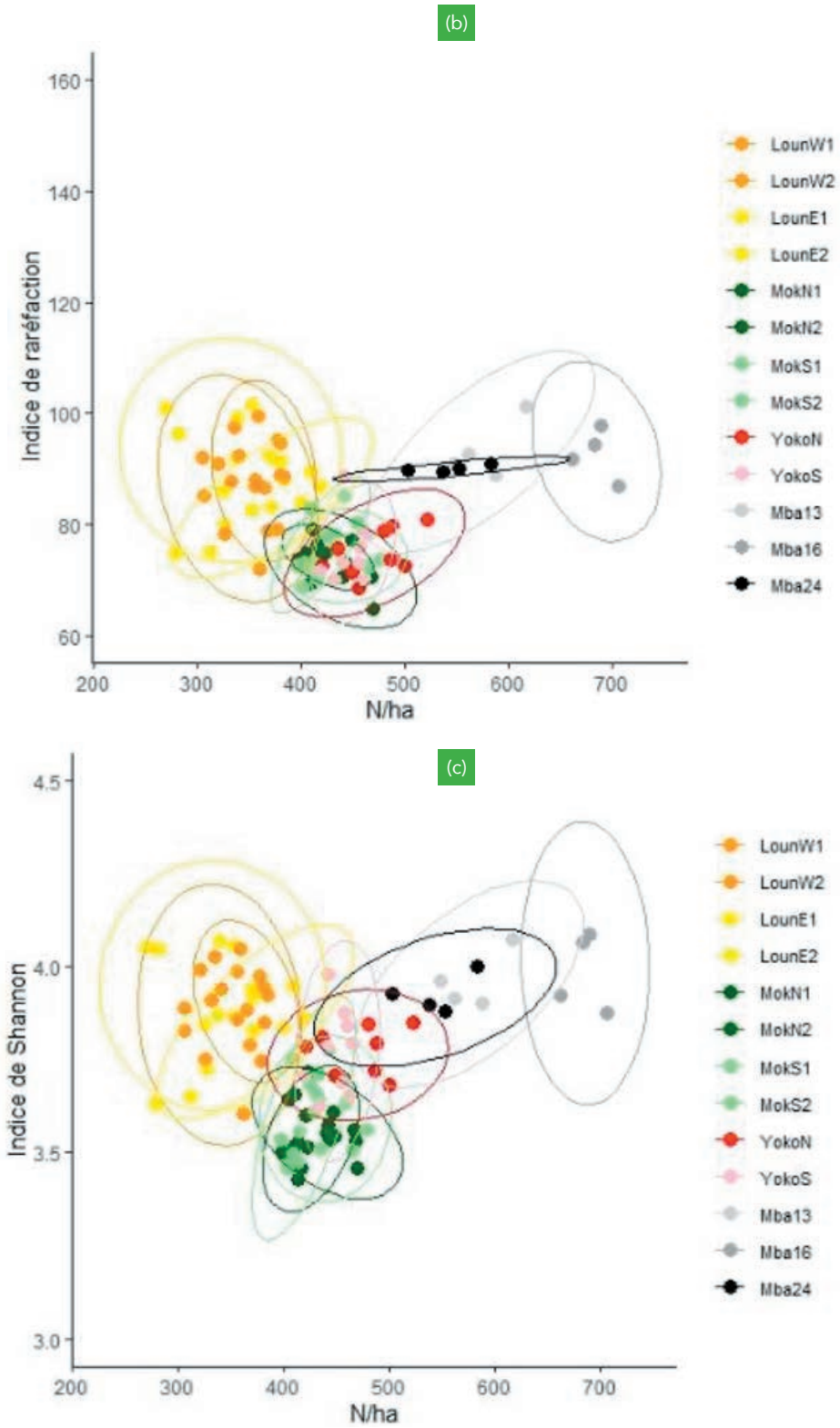


Fig. 14. *Richesse et diversité spécifique des quatre sites, en fonction de la densité d'arbres présents en 2018. Chaque point représente un carré de 1 ha. (a) Richesse spécifique : nombre total d'espèces présentes sur chaque carré. (b) Indice de raréfaction : nombre d'espèces apparaissant dans un échantillon de 262 arbres tirés au hasard au sein de chacun des carrés de 1 ha. Deux cent soixante-deux correspond au plus petit effectif présent dans l'un des carrés (à Loundoungou). (c) Indice de diversité de Shannon calculé sur le même type d'échantillons. Les tirages au hasard sont répétés 1000 fois.*

3.3.4 Une richesse sous-estimée

Au sens biologique du terme, une espèce est un ensemble d'individus pouvant se reproduire entre eux et engendrer une descendance fertile. Comme pour d'autres organismes, la délimitation des espèces d'arbre était fondée jusqu'à récemment sur des critères essentiellement morphologiques : caractères de reproduction (fleurs, fruits, …) et végétatifs (aspects des feuilles, des troncs, …). La démocratisation récente des approches de génétique moléculaire a toutefois permis de reconsidérer certaines classifications taxonomiques, voire de mettre en lumière l'existence de nouvelles espèces pour la science. Il était par exemple déjà connu qu'il existait deux espèces de Tali : *Erythrophleum suaveolens et E. ivorense*. Dans le cadre du projet DynAfFor ces différences ont pu être confirmées (en lien avec leurs réponses physiologiques) (Gorel et al., 2019) et étendues à d'autres espèces cryptiques[16].Deux espèces sont dites cryptiques lorsqu'elles sont physiquement très similaires et ont été confondues sous la même appellation, bien que représentant des entités biologiques distinctes généralement incapables de se reproduire entre elles. Les implications pratiques pour le gestionnaire forestier sont loin d'être négligeables car chacune de ces espèces peut avoir sa propre dynamique démographique (croissance, mortalité, phénologie, régénération). Il conviendrait donc, par exemple, d'adapter les diamètres minima d'exploitabilité (DME)[17] et de calculer les taux de reconstitution pour chaque espèce.Les dispositifs du réseau DynAfFor ont été des sites privilégiés pour les études génétiques et il s'est avéré que de nombreux taxons exploités sont concernés par l'existence d'espèces cryptiques : les genres *Khaya* (Acajou), *Guibourtia* (Bubinga, Ovengkol), *Milicia* (Iroko), *Afzelia* (Doussié), *Lophira* (Azobé), *Staudtia* (Niové), *Dialium* (Eyoum) (Bouka et al., 2019 ; Tosso et al., 2018 ; Daïnou et al., 2016 ; Donkpegan, 2017 ; Ewedjè et al., 2020). L'aire de répartition de la plupart des nouveaux taxons est encore mal connue mais certains semblent présenter une répartition réduite et devraient faire l'objet de mesures de gestion spécifiques. Le défi pour l'aménagiste et l'exploitant forestier reste la différenciation des individus cryptiques sur le terrain : leur distinction n'est souvent pas aisée. Les travaux qui se poursuivent visent à identifier des caractères pratiques permettant une telle distinction (Fig. 15). D'un point de vue plus fondamental, cela confirme que **le nombre réel d'espèces présentes dans les forêts d'Afrique centrale est sous-estimé.**

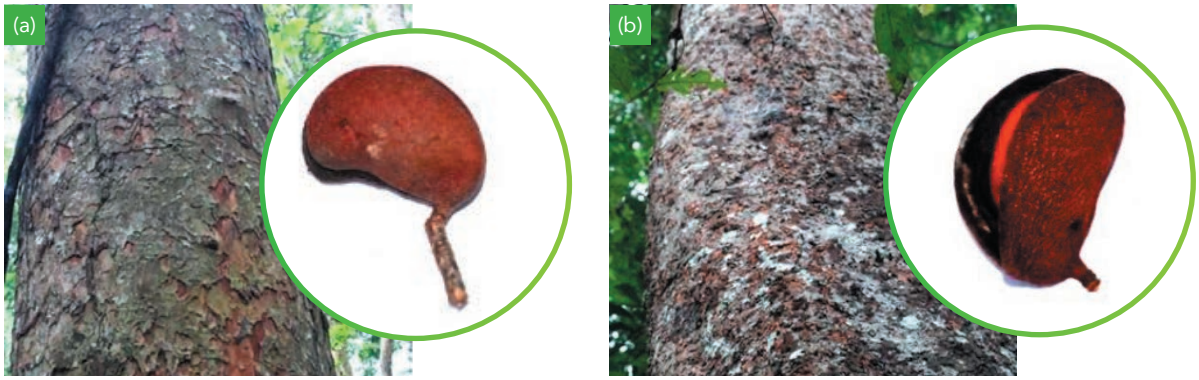


Fig. 15. *Ecorce (à gauche) et gousse (à droite) du Bubinga : a) Guibourtia pellegriniana et b) Guibourtia tessmannii (© F. Tosso)*

16. Espèces cryptiques : elles ne présentent pas de différences sur le plan morphologique permettant d'isoler une nouvelle espèce, mais elles présentent des différences notables sur le plan génétique, repérées grâce aux outils moléculaires.

17. Diamètre minimum d'exploitabilité : diamètre fixé par les réglementations nationales. On ne peut pas exploiter un arbre en-dessous du DME.

4. UNE DYNAMIQUE VARIABLE D'UN SITE À L'AUTRE, À L'ÉCHELLE DES PEUPLEMENTS COMME À CELLE DES POPULATIONS

Après avoir caractérisé les forêts abritant les dispositifs, la dynamique des peuplements et des populations d'arbres a été analysée pour répondre aux questions suivantes :

A l'échelle des peuplements :

- La dynamique est-elle différente entre les sites ?
- Quels sont les facteurs qui influencent cette dynamique ?
- Quel est le rôle joué par la banque de graines du sol dans la régénération des peuplements ?

A l'échelle des populations :

- La croissance des espèces est-elle différente entre les sites ?
- A partir de quels diamètres ces espèces commencent-elles à se reproduire ?
- Comment le pollen et les graines sont-ils dispersés et à quelle distance ?

Des modèles ont ensuite été créés pour prédire l'évolution des peuplements et des populations. Enfin, la télédétection a été utilisée afin de suivre cette évolution, notamment suite à l'exploitation forestière.

4.1 LA DYNAMIQUE DES PEUPLEMENTS

4.1.1 Une croissance moyenne variant peu entre peuplements, les taux de mortalité et de recrutement davantage

Quatre années d'inventaires sont aujourd'hui disponibles sur les deux dispositifs complets : 2015, 2016, 2017 et 2018. Seul le site de Loundoungou a pu faire l'objet d'un cinquième inventaire en 2019. Durant la même période (2015-2019), le dispositif de M'Baïki a pu être inventorié quatre fois, et celui de Yoko deux ou trois fois selon les parcelles.

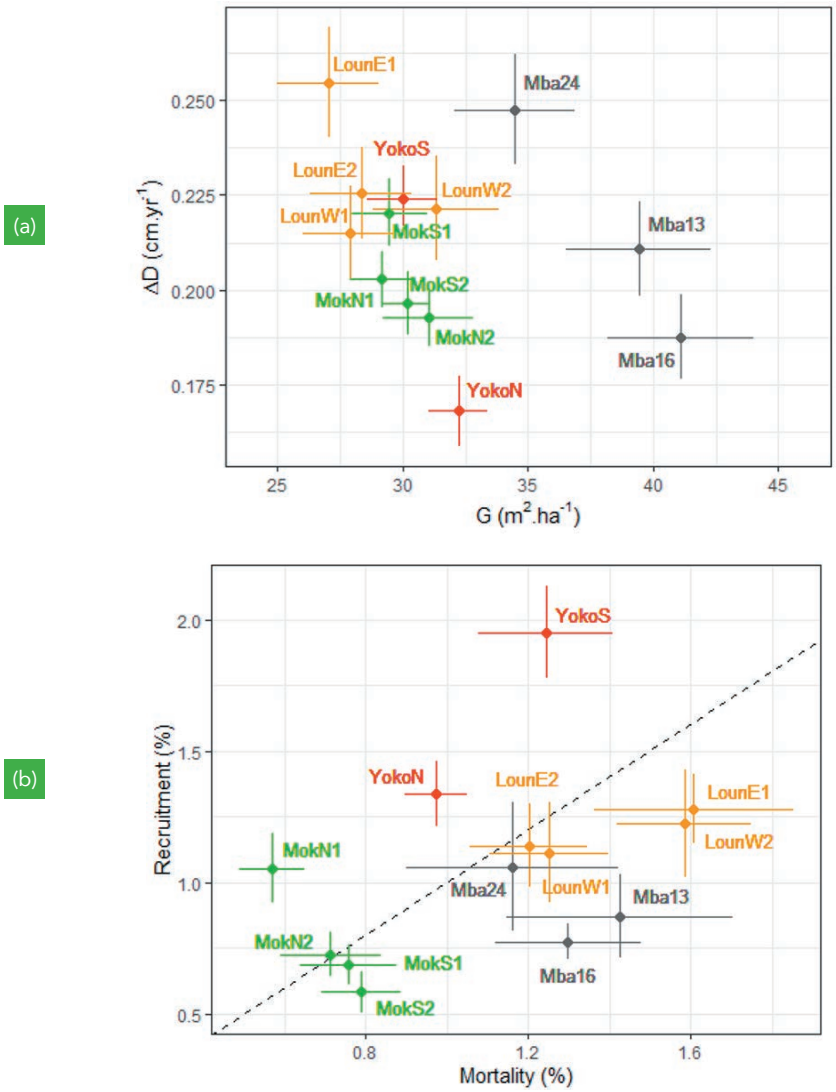


Fig. 16. *(a) Accroissements moyens en diamètre (AD, calculé sur les arbres ne présentant aucune anomalie sur leur tronc) sur les quatre sites en fonction de la surface terrière (G) des parcelles des quatre sites. Années prises en compte : 2015-2018 pour toutes les parcelles, mise à part Yoko Nord (période 2008-2018). G est calculée en 2018. Les intervalles de confiance à 95 % sont ceux de la moyenne de chaque variable (calculés en utilisant la loi de Student). (b) Taux moyen annuel de mortalité et de recrutement sur les différents sites, calculés sur les mêmes périodes. Les barres représentent les écart-types des moyennes (calculés en tenant compte du mode de calcul des taux).*

L'analyse comparative de l'accroissement diamétrique des arbres montre : (i) une grande hétérogénéité de comportement au sein des dispositifs, et (ii) une grande homogénéité entre les dispositifs (Fig. 16a). Cette homogénéité entre les dispositifs n'était pas attendue : l'une des hypothèses sur laquelle reposait DynAfFor était que la dynamique des forêts n'était pas la même sur les substrats géologiques sélectionnés. Il était attendu, en particulier, un accroissement diamétrique, plus faible sur les grès de Carnot (site de Mokabi) et plus élevé sur les alluvions du Cénozoïque (site de Loundoungou) et les grès-quartzites du Précambrien (site de M'Baïki), ces derniers étant supposés être les plus fertiles. Les données rassemblées par DynAfFor ne le confirment pas : les arbres accroissent leur diamètre aussi rapidement sur le site de Mokabi que sur le site de M'Baïki. Plusieurs explications peuvent être avancées : (i) la compétition exercée sur les arbres par leurs voisins est

plus intense sur le site de M'Baïki que sur le site de Mokabi, effaçant ainsi l'effet de la richesse des sols ; (ii) les sols supposés pauvres à l'origine sur les grès de Carnot le sont beaucoup moins que prévu ; (iii) d'autres phénomènes jouent sur le comportement des arbres, comme la présence inattendue de très grandes termitières actives sur les sites de Loundoungou, Mindourou et Mokabi, qui augmentent localement la teneur en argile et la fertilité des sols. Une publication des résultats issus d'une analyse approfondie de la croissance sur ces quatre sites est en préparation.

Les deux autres processus de la dynamique des peuplements, la mortalité et le recrutement, sont plus difficiles à évaluer de manière rigoureuse. Les inventaires menés à M'Baïki depuis 1982 montrent qu'il faut disposer d'une longue période de suivi pour que leur quantification soit fiable. Le nombre d'arbres concernés est faible (environ 1 % du nombre de vivants) et très variable d'une année sur l'autre. Lors de la réalisation des inventaires, l'attention des équipes se porte sur les arbres déjà numérotés et sur la prise de mesure : ils ne s'aperçoivent pas forcément que l'arbre est mort, et ils ne repèrent pas forcément ceux qui viennent de franchir le diamètre de précomptage de 10 cm DHP. Les premières estimations (Fig. 16b) montrent que le taux de recrutement est nettement plus faible que le taux de mortalité à Loundoungou, les effectifs ayant donc tendance à diminuer. Il est identique à Mokabi, avec des effectifs qui restent stables, et nettement plus élevé à Yoko, indiquant des effectifs en augmentation. A M'Baïki, le comportement observé est proche de celui de Loundoungou, ce qui est nouveau : de 1982 à 2015, les effectifs ont augmenté chaque année sur les parcelles témoins, et c'est la première fois qu'une diminution apparaît.

Même s'il est difficile de se baser sur une courte période pour conclure, certains comportements observés sont logiques : le site de Mokabi porte une forêt ancienne, très peu perturbée par le passé, à l'équilibre. Le site de Yoko a été fortement perturbé par le passé, comme le montrent les traces d'anciens villages à proximité, et l'abondance de l'espèce pionnière *Pericopsis elata* (l'Afrormosia), et la forêt est en cours de reconstitution. La dynamique en cours à Loundoungou, vieille forêt secondaire qui devrait être en reconstitution, est plus étonnante, mais pourrait être due à la présence des Marantacées dans son sous-bois. Enfin, globalement, le turnover des peuplements (c'est-à-dire la moyenne entre le taux de mortalité et le taux de recrutement) est plus faible à Mokabi que sur les trois autres sites, pouvant illustrer le stade très avancé de cette forêt dans le cycle sylvigénétique : le peuplement est davantage constitué d'espèces tolérantes à l'ombrage et à bois plus dense, dont la durée de vie est probablement plus longue.

Quels effets ont la croissance, la mortalité et le recrutement sur le stockage du carbone en forêt ? L'accroissement diamétrique et la mortalité jouent sur la dynamique de la biomasse et donc du carbone dans les peuplements, mais la taille des arbres qui les constituent joue également. Bien que les arbres de grande taille continuent de croître, et stockent une grande quantité de cette biomasse, leur contribution à sa production est limitée en comparaison de celle des petits arbres qui croissent plus vite, sont plus nombreux et occupent mieux l'espace (Ligot et al., 2018). L'accumulation de la biomasse dans les peuplements diminue donc avec l'abondance des grands arbres, et peut même devenir négative (la forêt devient source de carbone) lors d'épisodes de mortalité importante, comme cela a été observé en Amazonie (Phillips et al., 2009).

4.1.2 Des modifications probables de la dynamique, de la structure et de la composition des forêts d'Afrique centrale sous l'effet du changement climatique

Deux gros travaux ont été menés en parallèle à DynAfFor, s'intéressant au futur prévisible des forêts peu perturbées d'Afrique centrale. Le premier s'est concentré sur les données de M'Baïki (Claeys et al., 2019), le deuxième sur un réseau régional de parcelles mentionné au chapitre 2 (Hubau et al., 2020), auquel ont été ajoutées les trois parcelles témoins du dispositif de M'Baïki.

A M'Baïki, Claeys et al. (2019) ont montré que sous climat constant, le peuplement forestier suit un cycle normal d'évolution vers la maturité, avec une dynamique plus lente et une diminution de l'abondance des espèces pionnières. Le changement du climat prévu selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5[18] provoquera une augmentation de tous les processus de dynamique : croissance, mortalité et recrutement. La structure sera modifiée avec une diminution des effectifs et une augmentation du diamètre quadratique moyen des arbres. L'ampleur des changements variera d'un groupe d'espèces à l'autre, entraînant de nettes différences entre ces groupes, liées à leur autécologie : d'une manière générale, les espèces pionnières à longue durée de vie bénéficieront du changement au détriment des espèces tolérantes à l'ombrage ce qui, paradoxalement, pourrait à court terme bénéficier à l'exploitation forestière.

Les paramètres climatiques ayant le plus d'effet sur la dynamique des peuplements varient selon les processus : la croissance dépend essentiellement, selon les scénarios de changement, de la durée d'ensoleillement ou de la température, alors que la mortalité dépend de la température et, dans une moindre mesure, du ruissellement. Le recrutement quant à lui dépend essentiellement de la structure du peuplement (surface terrière et effectif).

A l'échelle de l'Afrique centrale et de l'Afrique de l'Ouest, les forêts denses humides tropicales peu perturbées stockent du carbone de manière régulière depuis le début des années 1990, contrairement aux forêts d'Amérique du Sud : ces dernières en stockent toujours, mais de moins en moins. En Afrique, les gains en biomasse dus à la croissance et au recrutement, et les pertes en biomasse dues à la mortalité, restent stables, et les gains sont supérieurs aux pertes. Les principaux facteurs influençant cette évolution sont : (i) l'augmentation du CO2 atmosphérique, qui a un effet positif sur les gains et sur les pertes en biomasse ; (ii) la température moyenne annuelle qui a un effet négatif sur les gains ; (iii) la rapidité d'augmentation de cette température, qui a un effet négatif sur les gains et un effet positif sur les pertes ; et (iv) le temps de résidence du carbone dans le peuplement, qui a un effet négatif sur les pertes. Une extrapolation, sur les 20 prochaines années, des évolutions en cours, montrent que le déclin observé sur les forêts d'Amérique du Sud s'observera également sur les forêts africaines mais à un rythme moins rapide (Hubau et al., 2020).

La plupart des travaux réalisés sur la modélisation de l'évolution du stockage du

18. Scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 : il s'agit de deux des quatre scénarios (RCP : "Representative Concentration Pathway") établis par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). Ils correspondent à des niveaux de forçage radiatifs qui seraient atteints en 2100, 4,5 W/m2 et 8,5 W/m2 respectivement.

19. Diamètre quadratique : racine carrée de la moyenne des carrés des diamètres mesurés sur les arbres.

carbone dans les forêts sous différents *scenarii* climatiques ont été menés dans des forêts anciennes. Or celles-ci sont de plus en plus rares suite aux pressions anthropiques. L'impact de l'exploitation forestière sur cette dynamique n'est encore que peu mesuré et les dispositifs mis en place dans le cadre de DynAfFor apporteront des réponses dans les années à venir (Fig. 17).

Fig. 17. *Quel sera l'impact de l'exploitation forestière sur la dynamique de stockage du carbone ? Le réseau DynAfFor y répondra dans les années à venir. (a) Route principale dans une UFA du Cameroun (© JL. Doucet). (b) Grumiers stationnés à Lola (nord du site de Mokabi, © S. Gourlet-Fleury).*

4.1.3 Le rôle essentiel de la banque de graines du sol

La quantification de la dynamique des peuplements passe par celle de trois processus : la croissance, la mortalité et le recrutement. La quantification du recrutement se fait en comptant le nombre de nouveaux arbres apparus au-dessus du seuil de précomptage, entre deux inventaires. Le recrutement représente une simplification considérable des processus de la régénération naturelle, allant de la floraison et de la fructification des arbres reproducteurs au diamètre de précomptage d'un individu, après être passé par la dispersion, la survie et le développement des graines, puis ceux des plantules et des juvéniles.

La banque de graines du sol[20] constitue l'un des stades importants des processus de la régénération naturelle dans les milieux forestiers. Elle représente l'ensemble des graines viables présentes dans le sol. Elle joue un rôle fondamental dans le processus de cicatrisation forestière résultant d'une perturbation naturelle ou anthropique. Elle est peu documentée dans les forêts africaines, tandis qu'elle est largement valorisée ailleurs dans les programmes de réhabilitation ou de restauration forestière.

Dans le cadre de DynAfFor, des travaux ont été menés au Cameroun et en République du Congo afin de combler ces lacunes. La banque de graines du sol s'est avérée être spatialement hétérogène, avec des spécificités en lien avec le type de végétation et son niveau de maturité. Par exemple, la composition de la banque de graines du sol d'une forêt à *Manilkara* (Mokabi) est significativement différente de celle d'une forêt à *Celtis* (Loundoungou). Les espèces d'arbres

20. Banque de graines du sol : désigne l'ensemble des graines viables présentes dans le sol, dans la litière et dans l'humus. Ces graines sont capables de germer et de remplacer des plantes adultes ayant disparu pour différentes raisons.

pionnières divergent, probablement en lien avec leur tolérance à la sécheresse (Douh et al., 2018).

Si l'abondance des graines décroît avec la profondeur du sol, il est important de souligner que des densités non négligeables de graines viables subsistent jusqu'à des profondeurs de 20 cm. Les densités de graines dormantes dans le sol sont de l'ordre de 200 à 350 graines/m² pour l'horizon 0-20 cm. Le nombre d'espèces varie de 30 à 50 selon les sites forestiers, dont environ un tiers d'espèces arbustives ou arborées. Quelques espèces exploitables y sont représentées : le Bilinga, le Fraké, l'Iroko, l'Onzabili et le Tali (Fig. 18). En particulier, la plus forte abondance des graines du Tali dans le sol des forêts à *Celtis* suggère une pérennité plus importante de cette espèce dans ce type de peuplement. Elle s'explique par une fructification probablement plus régulière dans les forêts secondaires comparativement aux forêts matures.

Sur certains sites, la banque de graines du sol contient des espèces d'arbres disparues de la végétation environnante, témoignant ainsi de la longue viabilité de certaines graines dormantes (plusieurs décennies ou siècles). A l'image de ce qui se fait sur d'autres continents, les parcs de chargement des grumes en forêt devraient être systématiquement recouverts de la terre amassée et entassée avant le démarrage des activités, qui contient une bonne partie de cette banque de graines. Cela accélère grandement la cicatrisation forestière et réduit les efforts de reboisement.

Fig. 18. *Les graines du Tali alimentent la banque de graines du sol (© JL. Doucet)*

4.2 LA DYNAMIQUE DES POPULATIONS

4.2.1 Une croissance moyenne très hétérogène des espèces suivies sur les sentiers

Les sentiers du réseau ont permis d'obtenir des informations très importantes sur le comportement en croissance et en mortalité des principales espèces commerciales d'intérêt pour les gestionnaires forestiers. Sur certains sentiers, il a également été possible d'observer les effets de l'exploitation sur la croissance. Le comportement des espèces est beaucoup plus hétérogène que celui des peuplements.

L'accroissement diamétrique moyen des arbres localisés sur les sentiers témoins varie nettement entre espèces et entre sites (Fig. 19). Les accroissements les plus élevés sur les sentiers témoins sont observés sur l'Ayous, le Béli et le Dabéma. Il est intéressant de noter qu'il n'existe pas de sentier sur lequel l'ensemble des espèces suivies présente des accroissements systématiquement plus élevés ou systématiquement plus faibles, ce qui montre que les facteurs explicatifs de ces différences ne sont pas exclusivement liés aux sols ou au climat. L'optimum écologique propre à chaque espèce et l'environnement de croissance des individus (dont la concurrence) jouent des rôles déterminants.

Au niveau de la mortalité, pour les six sites du Cameroun et du Gabon, après avoir enlevé les combinaisons sites-espèces totalisant moins de 100 arbres, pour une période moyenne de 3,4 années d'observation, la mortalité globale annuelle a été de 0,6 %.

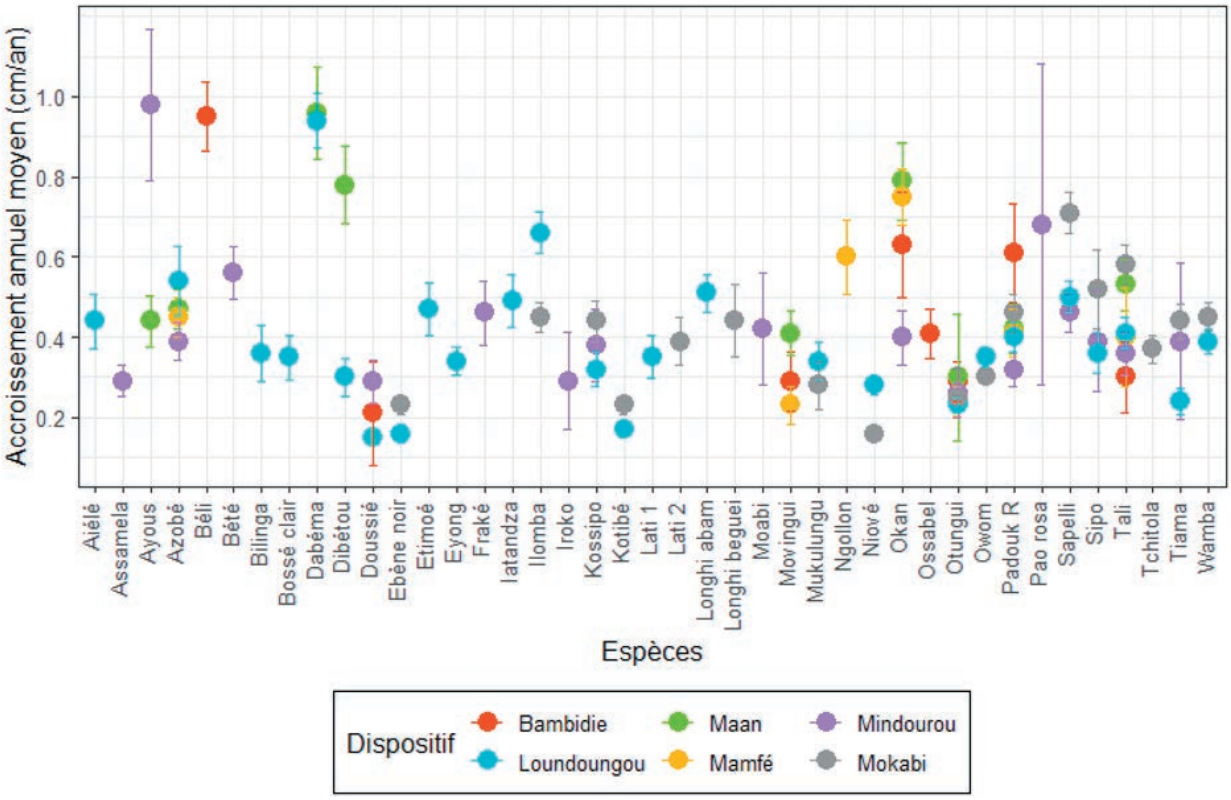


Fig. 19. *Accroissements diamétriques moyens des espèces représentées par au moins 15 individus sur les sentiers témoins des différents sites (exception pour le Doussié à Bambidie, l'Iroko à Mindourou et le Pao rosa à Mindourou, peu représentés). Les intervalles autour des points indiquent les intervalles de confiance à 95 % de l'estimation de l'accroissement moyen.*

Par ailleurs, bien que très sélective (avec une ouverture de la canopée augmentée de 6 à 10 %), l'exploitation a un effet généralement positif sur cet accroissement. Des variations sont néanmoins observables entre espèces et entre sites. Alors que les augmentations moyennes des accroissements sont de 35 % à Maan et de 78 % à Mindourou en zone exploitée, l'impact est faible, voire négatif à Bambidie (Fig. 20). Cela pourrait être lié à une période de suivi post-exploitation plus réduite sur ce site.

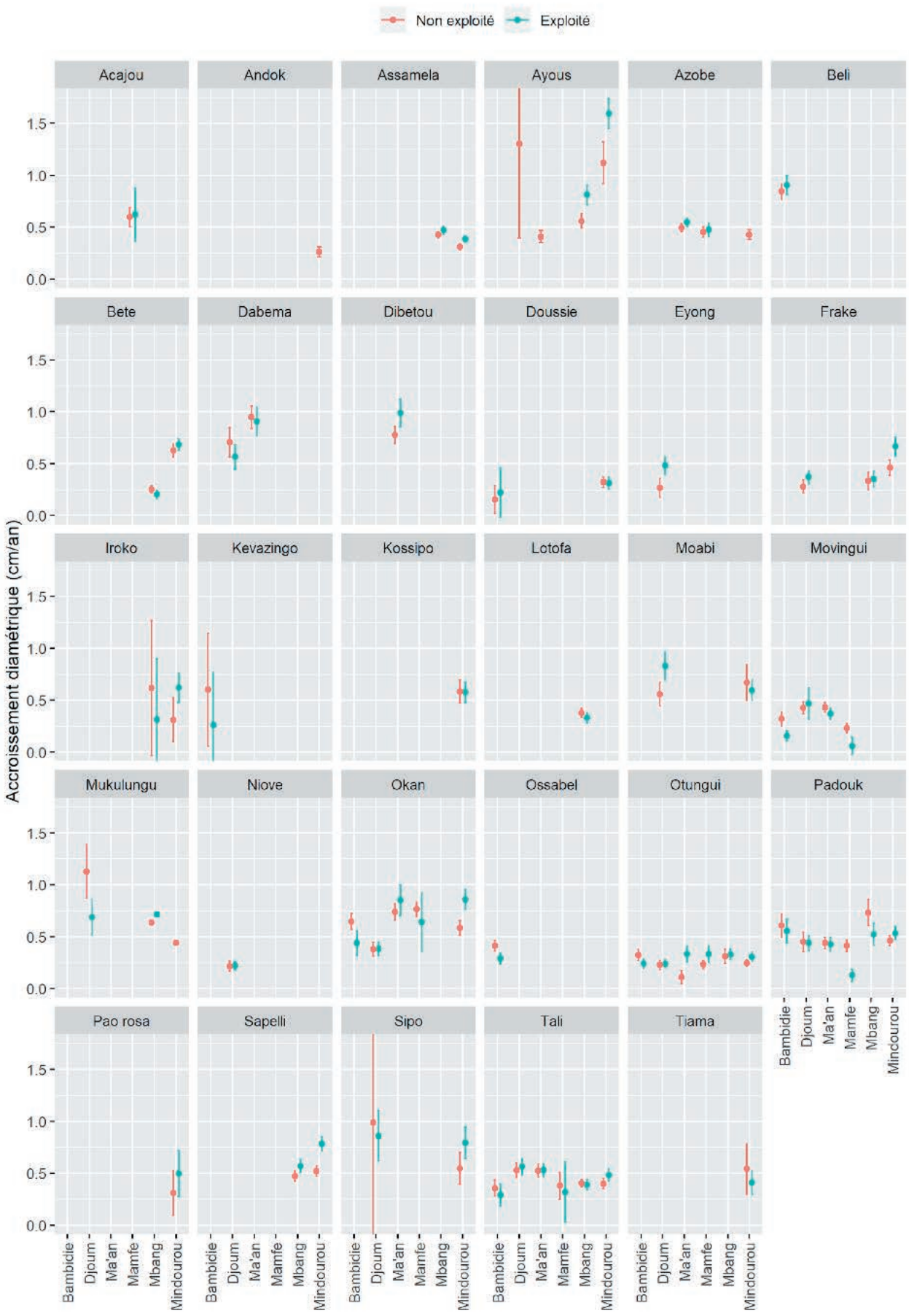


Fig. 20. *Effet de l'exploitation sur les accroissements diamétriques moyens (et intervalles de confiance à 95 % de l'estimation de l'accroissement moyen) des espèces suivies sur les différents sentiers.*

La croissance et sa variabilité ont été étudiées plus en détail pour l'Ayous sur plusieurs sites du Cameroun et du Congo, ainsi qu'à M'Baïki. L'accroissement moyen en diamètre de l'espèce dans des forêts non perturbées varie de 0,40 cm.an-[1] au sud du Cameroun à 0,83 cm.an-[1] au sud-est du Cameroun. Cet accroissement varie peu en fonction du diamètre des arbres, mais peut doubler après perturbation (Ligot et al., 2019). La stimulation de la croissance par l'exploitation peut durer entre 10 et 20 ans selon les espèces et selon les études qui ont traité cette question, ce qui indique qu'il faut absolument poursuivre les observations dans les années à venir. En attendant une connaissance plus fine de cette dynamique en milieu plus ou moins récemment exploité, il est recommandé aux aménagistes de ne considérer que les données issues des sentiers témoins lorsqu'ils estiment l'effectif ou le volume des arbres qui deviendront exploitables dans le futur.

Sur les sentiers, l'accroissement diamétrique est estimé à l'aide de mesures répétées d'échantillons d'arbres nécessitant donc un suivi dans le temps. La dendrochronologie, qui analyse les cernes des arbres pour étudier leur évolution, peut permettre un gain de temps appréciable si l'espèce considérée se prête à ce genre d'analyse (lisibilité des vrais cernes, présence de faux cernes et/ou de cernes nuls, etc.). L'expérience accumulée dans le cadre de DynAfFor démontre que de tels travaux sont réalisables sur l'Ayous, le Moabi, le Sapelli et le Tali (Fig. 21, Fétéké et al., 2017). Les résultats obtenus ne sont toutefois fiables et comparables à ceux issus des suivis dans le temps que si l'analyse des cernes se fait sur un échantillon d'arbres représentatifs de la population (et non pas sur les plus grands arbres exploités, comme cela est souvent le cas).

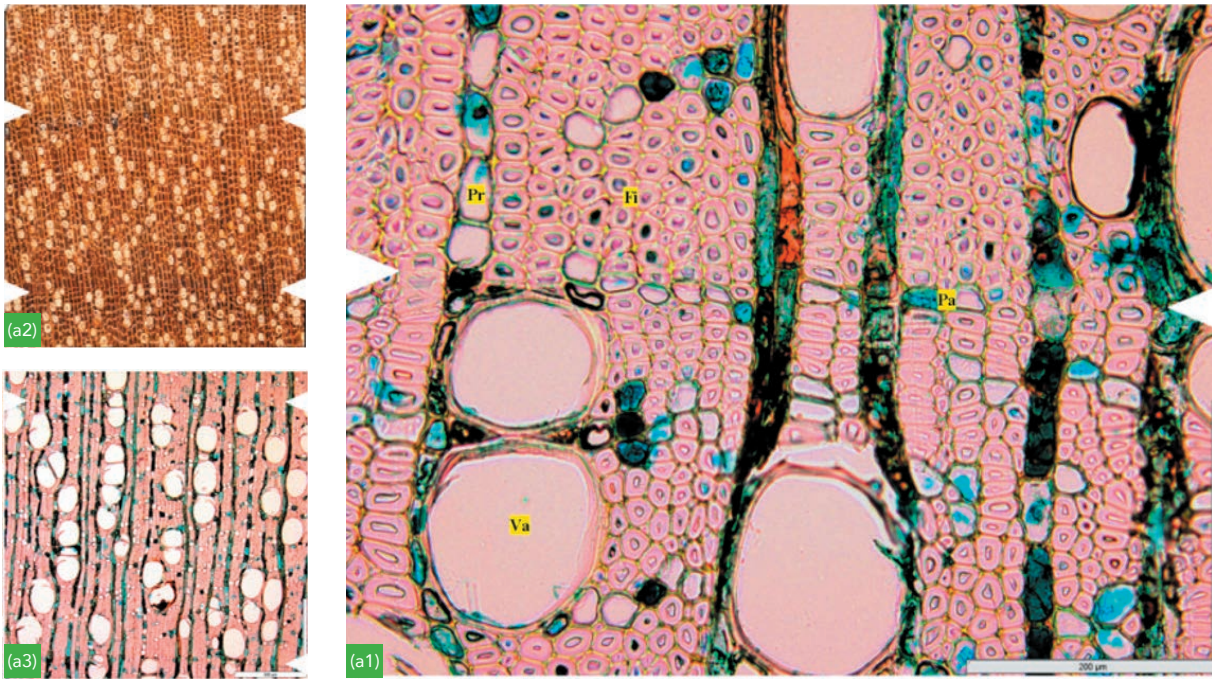


Fig. 21. *Anatomie macroscopique (a1) et microscopique (a2 et a3) de la section transversale du bois de Moabi. Les triangles en blanc indiquent la limite entre les cernes. Fi : fibres ; Pa : parenchyme axial ; Pr : parenchyme radial ; Va : vaisseaux (Fétéké et al., 2016).*

4.2.2 Des diamètres de reproduction à prendre en compte dans les décisions d'aménagement

La dynamique des populations d'arbres adultes dépend fortement des processus impliqués dans la régénération naturelle (voir § 4.1.3). La caractérisation et la compréhension des mécanismes qui les affectent sont donc fondamentales pour pouvoir garantir un aménagement durable à long terme. En particulier, quantifier la taille à partir de laquelle des arbres deviennent des reproducteurs est essentiel pour fixer des diamètres minima d'exploitabilité (DME) compatibles avec le maintien des populations sur le long terme.

Certains sentiers établis pour le suivi de la croissance et de la mortalité ont donc fait l'objet d'observations phénologiques[21] régulières (une fois par mois en général). Cela a permis de calculer le diamètre de fructification efficace (DF), qui est une estimation du diamètre à partir duquel au moins 50 % des arbres de la population produisent des graines aptes à germer. Le Tableau 2 donne des exemples de DME au Cameroun et de DF obtenus en Afrique centrale pour une gamme d'espèces. Si la situation paraît rassurante pour la plupart de ces espèces – une tendance assez générale dans tous les pays d'Afrique centrale –, elle montre aussi que le DME de quelques-unes d'entre elles, l'Ayous, le Kosipo, le Niangon et le Tali, devrait être augmenté. Le DF peut significativement varier en fonction du type forestier (Ouédraogo et al., 2018), mais demeure en général beaucoup plus stable que l'accroissement en diamètre.

Tableau 2. *Diamètre minimum d'exploitabilité (DME) et diamètre de fructification efficace (DF) d'une série d'espèces exploitables du Cameroun. Les DF sont mis en rouge lorsqu'ils sont supérieurs au DME. Les DF ont été obtenus dans le cadre de travaux de membres du collectif DYNAFAC.*

Nom commercial	DME	DFR	Nom commercial	DME	DFR
Acajou d'Afrique	80	60	Movingui	60	50
Afrormosia	90	60	Niangon	50	60
Aniégré	60	50	Niové	50	30
Ayous	80	90	Okan	60	60
Azobé	60	50	Okoumé	80	50
Bété	60	40	Ovengkol	80	50
Bossé clair	80	50	Ozigo	50	40
Ebène noir	60	30	Padouk	60	40
Eyong	50	30	Sapelli	100	70
Fraké	60	40	Sipo	80	80
Ilomba	60	50	Sorro	50	50
Iroko	100	50	Tali	50	60
Kosipo	80	90	Tiama	80	60
Lotofa	50	40	Tola	100	60
Moabi	100	90	Wengé	50	40

21. Phénologie : étude de l'influence des variations climatiques sur les processus biologiques et les comportements rythmiques chez les êtres vivants, animaux et végétaux (feuillaison, floraison, fructification, coloration des feuilles… chez les végétaux).

On a tendance à penser que les plus gros arbres (arbres dits « monumentaux ») sont les meilleurs semenciers. Toutefois, on constate souvent que la fraction d'arbres fructifiant diminue dans les grandes classes de diamètre. Des analyses de parenté effectuées à l'aide de marqueurs moléculaires[22] (pour des espèces telles que l'Ayous, le Kosipo, le Movingui, le Sipo, le Tali ou le Tiama) aboutissent aux mêmes conclusions (Monthe, 2019). Les meilleurs semenciers participant à la régénération naturelle des populations d'arbres se situent donc surtout dans les classes de diamètre intermédiaires. Cette information est essentielle pour le choix des semenciers à préserver. Dans le cas de l'Ayous (Fig. 22), près de la moitié des arbres pollinisateurs font entre 90 et 110 cm de diamètre, et la moitié des femelles produisant des graines de qualité font entre 100 et 130 cm de diamètre (Le Garrec, 2020).

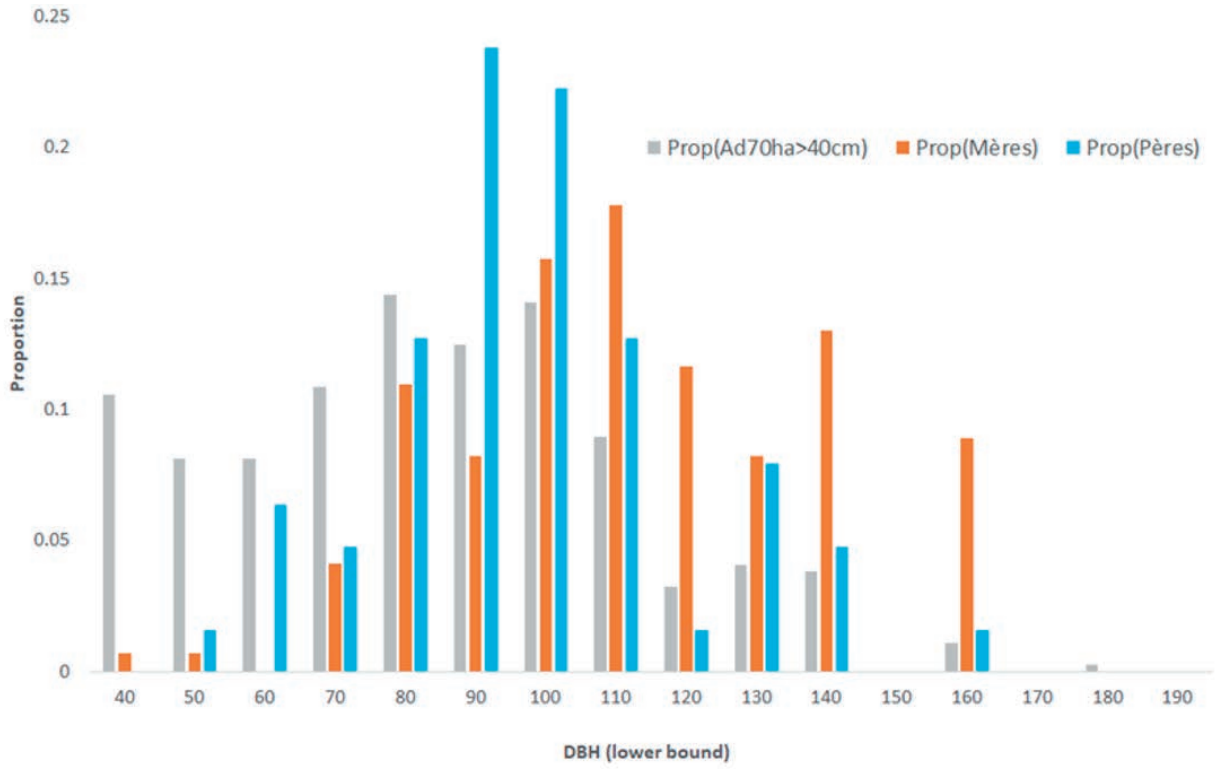


Fig. 22. *Fréquence relative, par classe de diamètre, des arbres ayant contribué à la pollinisation (mâles, en bleu) et à la régénération naturelle (femelles en orange) dans une population d'Ayous (en gris) (Le Garrec, 2020).*

A l'aide d'analyses génétiques de parenté, les distances de dispersion du pollen ont pu être calculées, les résultats sont synthétisés dans le Tableau 3.

22. Marqueur moléculaire : catégorie de marqueur génétique. Il s'agit d'un fragment d'acide nucléique (ADN ou ARN) permettant de mesurer la variabilité entre les individus au sein ou entre les espèces.

Tableau 3. *Étude des flux de gènes dans les dispositifs DynAfFor : mode de dispersion, taux de consanguinité au niveau des graines et des adultes, distance moyenne de dispersion du pollen, distance moyenne de dispersion des graines, densité d'adultes par km² en fonction du site d'étude.*

Espèces	Mode de dispersion	Taux de consanguinité graines / adultes	Distance moyenne de dispersion du pollen	Distance moyenne de dispersion des graines	Densité d'adultes par km²	Site d'étude
Afrormosia (1)	vent	55 % / 20 %	1100 m	120 m	45	Biaro
Ayous (2)	vent	2 % / 2 %	> 1000 m	115 m	276	Alpicam
Kosipo. (3)	vent	4 % / 17 %	750 m	280 m	38	Loundoungou
Moabi (4)	animaux	10 % / 0 %	1075 m / 300 m	390 m / 500 m	6 / 7	Dja / Mindourou
Movingui (5)	vent	6 % / 9 %	700 m	70 m	114	Bambidie
Sapelli (6)	vent	14 % / 0 %	500 m	450 m	60	Loundoungou
Sipo (3)	vent	3 % / 4 %	1800 m	280 m	3	Loundoungou
Tali (2)	animaux	20 % / 0 %	300 m	175 m	178	Mindourou
Tiama (3)	vent	1 % / 2 %	625 m	260 m	20	Loundoungou

(1) Assumani et al. (en cours) ; (2) Le Garrec 2020 ; (3) Monthe (2019) ; (4) Evrard et al. (en cours) ; (5) Hardy et al. (2019) ; (6) Monthe et al. (2017).

Pour toutes les espèces étudiées, les distances de dispersion du pollen sont supérieures à 300 m (Fig. 23). Ces distances permettent d'évaluer l'impact de l'exploitation forestière sur l'aptitude des espèces à se reproduire. **Compte tenu de la densité d'adultes dans les sites étudiés, l'exploitation ne semble pas compromettre la pollinisation. Une fois encore ces observations ne sont valables que pour ces sites car, en fonction des sites et du type forestier, les densités d'arbres adultes sont très variables.**

Plusieurs espèces sont soumises à une dépression de consanguinité[23]. C'est le cas de l'Afrormosia, du Moabi, du Sapelli et du Tali. Lorsque la production de ces espèces est envisagée en pépinière, les récoltes de graines ne doivent pas être faites dans des populations de faible densité, ayant des individus très isolés.

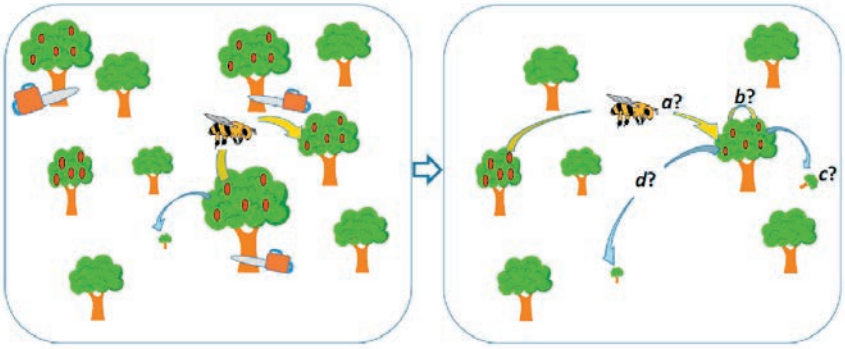


Fig. 23. *L'exploitation sélective dans une forêt naturelle (à gauche) réduit la densité d'arbres adultes (représentés avec des fruits dans leur houppier) et peut affecter leur reproduction (à droite) en fonction des capacités de dispersion (flèches). Lorsque la dispersion du pollen est limitée, les arbres isolés sont potentiellement moins bien pollinisés (a) ou s'auto-pollinisent (b), ce qui peut se traduire par une plus forte mortalité des jeunes plants en cas de dépression de consanguinité (c). En cas de dispersion limitée des graines suite à une recrudescence de la chasse dans les concessions, les sites favorables au développement des semis des espèces zoochores risquent d'être trop éloignés des arbres producteurs (d). Les conditions environnementales résultant de l'exploitation peuvent affecter positivement ou négativement la régénération selon l'écologie de l'espèce.*

4.2.3 Une dispersion des graines peu affectée par l'exploitation forestière

En fonction du type et de la composition de la végétation, de 60 à 90 % des arbres des forêts denses humides dépendent des animaux pour la dispersion de leurs semences[24]. La pression de braconnage peut avoir une incidence sur la faune impliquée dans la dispersion et, à terme, sur la régénération des espèces exploitées. Des études menées dans le cadre de DynAfFor ont testé l'impact de la défaunation sur quelques espèces d'arbres, et ont caractérisé la régénération en fonction du niveau de perturbation.

Pour le Moabi, 13 espèces animales différentes consomment ses graines. Dans les zones perturbées par l'homme, ce sont les rongeurs qui dominent : le Rat d'Emin (Cricetomys emini), l'Athérure africain (Atherurus africanus), la Funisciure à pattes rousses (Funisciurus pyrropus). Dans les milieux peu perturbés (une aire protégée en l'occurrence) ces rongeurs sont moins présents, au profit de grands mammifères disperseurs tels que l'Eléphant (Loxodonta cyclotis) (Fig. 24) ou le Chimpanzé (Pan troglodytes). Toutefois, dans ce cas précis, l'étude comparative des flux de gènes ne permet pas de conclure à un impact négatif de l'exploitation forestière. Les distances de dispersion sont même plus élevées dans la concession étudiée que dans l'aire protégée voisine. Ces observations sont également valables pour le Doussié dont la cohorte de disperseurs et de prédateurs (huit espèces animales observées) ne varie pas selon le site et est aussi dominée par les rongeurs (Evrard et al., 2018).

Fig. 24. *Plantules de Pao rosa et de Mukulungu issues de graines dispersées par les éléphants (©JL. Doucet))*

23. Dépression de consanguinité : elle se traduit par une réduction de la fitness (performance en termes de développement, de survie, de production de semences) des individus issus de croisements entre apparentés (cas des descendants provenant d'événements d'auto-pollinisation par exemple).

24. Semences : ce sont des graines ou d'autres organes de reproduction produits par une plante et permettant le développement d'un nouvel individu.

De façon assez inattendue, il s'avère que différentes espèces de céphalophes (*C. castaneus, C. silvicultor, Philantomba congica*, …) (Fig. 25) pourraient jouer un rôle non négligeable dans la dispersion des graines d'arbres tropicaux. Les petites graines du Bilinga et de l'Iroko se retrouvent dans leurs crottes avant d'intégrer la banque de graines du sol si les conditions environnementales ne permettent pas leur germination. Les graines plus grosses comme celles du Tali sont recrachées à l'écart de l'arbre producteur lors de la rumination (Houngbegnon, en cours).

Même si quelques espèces zoochores sont dispersées à grande distance (plusieurs kilomètres), les distances de dispersion de la plupart des espèces étudiées dans les dispositifs DynAfFor par des analyses génétiques de parenté sont de l'ordre de quelques centaines de mètres (100-300 m environ), ce qui donne une estimation de l'aire potentielle d'apparentement dans le voisinage d'un arbre. D'un point de vue sylvicole, les récoltes de graines doivent être réalisées sur des semenciers distants d'au moins 200 m les uns des autres, afin de limiter les risques de dépression de consanguinité dans les plantations créées, tout en évitant les récoltes sur les individus isolés (voir § 4.2.2).

Fig. 25. *Un individu de Cephalophus callipygus, potentiel disperseur de graines, photographié par un piège photographique (© D. Fonteyn)*

4.3 LE DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES DE DYNAMIQUE POUR PRÉDIRE L'ÉVOLUTION DES PEUPLEMENTS ET DES POPULATIONS

Les modèles développés dans le cadre de DynAfFor (DafMod) sont des modèles de dynamique des populations de type matriciel, appelés modèles de Usher[25]. Ce choix a été fait pour deux raisons : ce type de modèle est couramment utilisé en foresterie, et il est directement utilisable pour des problématiques de gestion à partir des données issues de dispositifs comme ceux de DynAfFor. En effet : (1) les modèles matriciels représentent les populations d'arbres par leurs effectifs en classes de diamètre comme le font les aménagistes ; (2) les paramètres d'aménagement (durée de rotation, Diamètre minimum d'exploitation, intensité d'exploitation) sont facilement intégrables dans les simulations ; (3) le critère légal de durabilité, c'est-à-dire le taux de reconstitution du stock exploitable, se calcule facilement à partir des résultats des simulations.

Les modèles matriciels reproduisent les trois processus de la dynamique forestière : le recrutement, la croissance et la mortalité. Ils sont ainsi composés de trois sous-modèles, un pour chaque processus. Les sous-modèles sont autonomes au sein d'un modèle matriciel, ce qui permet de les calibrer, de les modifier ou même d'en créer de nouveaux indépendamment des autres éléments du modèle.

Une fois que les modèles ont été conçus, des algorithmes ont été développés pour les calibrer à partir des données issues des dispositifs du réseau DynAfFor. Des inventaires réguliers, au minimum deux, sont nécessaires pour produire des données permettant de calibrer les sous-modèles. Pour que le modèle matriciel soit en mesure de reproduire le comportement de la forêt non perturbée, il faut suivre des arbres en situation non perturbée. Pour qu'il soit en mesure de reproduire le comportement de la forêt après exploitation, il faut suivre des arbres après exploitation. Selon la nature du dispositif, sentier ou parcelle, les algorithmes et leurs contraintes d'utilisation ne sont pas les mêmes :

1. Dans le cas des sentiers, la calibration du sous-modèle de croissance consiste simplement à calculer la croissance annuelle moyenne des arbres dans chacune des classes de diamètre en tenant compte de l'effet individuel « arbre ». La calibration du sous-modèle de mortalité consiste à calculer le taux de mortalité annuel moyen du groupe d'arbres présent dans chacune des classes de diamètre. La calibration du modèle de recrutement doit être faite manuellement par l'utilisateur, car les sentiers n'intègrent pas d'information sur ce processus. Plusieurs difficultés se posent en pratique : avoir suffisamment d'arbres dans chaque classe de diamètre pour obtenir des estimations fiables ; obtenir des taux de mortalité non nuls. Lorsqu'ils le sont, une valeur arbitraire doit être utilisée.

2. Dans le cas des parcelles, la calibration du sous-modèle de croissance consiste à mettre en relation les taux de transition annuels entre les classes de diamètre et la structure du peuplement, pour toutes les espèces présentes. Celle du sous-modèle de mortalité consiste à mettre en relation les taux de mortalité annuels dans les classes de diamètre avec la structure du peuplement. Et celle du sous-modèle de recrutement consiste à mettre en relation le nombre de recrutés avec les effectifs

25. Modèle matriciel de Usher : modèle mathématique permettant de prédire la dynamique d'une population ou d'un peuplement, décrits sous la forme d'un vecteur d'effectifs par classe de taille. Le vecteur prédit, au bout d'un temps t, est obtenu en multipliant t fois le vecteur de départ par une matrice de structure particulière contenant les paramètres de la dynamique.

de l'espèce concernée et la structure du peuplement. Cependant, beaucoup d'espèces étant représentées par un effectif limité d'arbres, il n'est pas possible en pratique de calibrer les sous-modèles pour chacune des espèces de la parcelle. Pour chacun des processus et pour chacune des classes de diamètre, des groupes d'espèces sont construits automatiquement.

Les modèles et leurs algorithmes de calibration sont opérationnels. Les indicateurs calculés sur leurs simulations correspondent aux informations utiles aux gestionnaires. Cependant la fiabilité des simulations et de leurs indicateurs nécessite un suivi de long terme des dispositifs notamment pour les parcelles.

4.4 L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR CARACTÉRISER LES FORÊTS ET SUIVRE LEUR ÉVOLUTION

En télédétection, la possibilité d'acquérir des images aériennes à très haute résolution par drone se démocratise, et constitue une avancée importante par rapport à l'imagerie satellitaire. En effet, les images drones présentent les avantages suivants :

- choix de la résolution spatiale pouvant descendre jusqu'au cm ;
- acquisition d'images possible sous la couverture nuageuse ;
- acquisition d'images, relativement facile à programmer, sur les zones et à la fréquence souhaitées.

Dans le cadre du projet DynAfFor, l'outil a été utilisé sur les dispositifs de Loundoungou et de Yoko pour les acquisitions suivantes :

Yoko

- Images RGB à 7 cm de résolution sur l'ensemble du dispositif ;
- images RGB à 4 cm de résolution sur une parcelle de 9 ha.

Loundoungou

- Images RGB à 10 cm de résolution pour faire l'état initial des 800 ha du dispositif avant exploitation puis des 400 ha de l'un des deux blocs, après son exploitation (bloc ouest) ;
- images RGB à 5 cm couvrant les quatre parcelles du dispositif (4 x 9 ha) avant exploitation puis les deux parcelles du bloc ouest après son exploitation.

Ces images ont permis de produire pour chaque mission une ortho-mosaïque des zones survolées et de générer un Modèle Numérique de Surface (MNS). Sur la base des ortho-mosaïques, plusieurs études ont été réalisées portant sur les relations entre la taille des houppiers des arbres et leur croissance en diamètre (à Loundoungou : Cheliout, 2019, à Yoko : Ndamiyehe Ncutirakiza et al., 2020). Ces études ont montré que certaines espèces pouvaient être reconnues à la texture et à la couleur de leur houppier, en particulier le Limbali, l'Essia, l'Owom et le Diania. Elles ont montré également que la croissance des arbres identifiés dépendait négativement de leur diamètre et positivement de la surface plane ou convexe de leur houppier, la surface convexe ramenée à la surface terrière de chaque arbre se révélant être la variable explicative la plus performante.

Fig. 26. *Photos prises par drone (a) du campement de Loundoungou sous un peuplement de Limbali (© N. Barbier) et (b) de la canopée de l'une des parcelles du dispositif (© Sylvafrica).*

A partir des MNS générés avant et après exploitation, il est possible de détecter des variations d'élévation, ce qui a permis de faire l'analyse des dégâts d'exploitation sur le dispositif de Loundoungou. Couplée à la récolte d'informations sur le terrain, la comparaison des ortho-mosaïques avant et après exploitation a permis de déceler et de caractériser les perturbations fines telles que les trouées d'abattage, les routes et une partie des pistes de débardage. Une première analyse a montré que la taille des trouées d'abattage varie de 80 à 980 m² , avec une taille moyenne de 401 m². Une relation significativement positive est observée entre le diamètre de l'arbre abattu et la surface correspondant à sa trouée d'abattage.

De nouveaux survols ont été réalisés en février 2020 avec d'autres capteurs dans le cadre d'études spécifiques, sur financement de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et du projet P3FAC (Partenariat Public-Privé pour gérer durablement les Forêts d'Afrique centrale, qui a pris le relai du projet DynAfFor) :

- acquisition d'images multispectrales (Vert(GRE), Rouge(RED), Red Edge(REG) et Proche Infrarouge(NIR)), pour aider à la reconnaissance des espèces et à la distinction des lianes dans les houppiers. Cette dernière activité a été réalisée dans le cadre d'une thèse de doctorat portant sur l'impact des lianes sur la dynamique forestière ;

- scan LiDAR, permettant de générer le Modèle Numérique de Terrain (MNT) du dispositif et faisant apparaître les termitières présentes sur le site. A partir du Modèle Numérique de Canopée (MNC), autre produit dérivé de base du LiDAR, différents calculs de hauteur peuvent être effectués. Le MNC servira aussi à affiner l'étude des dégâts d'exploitation.

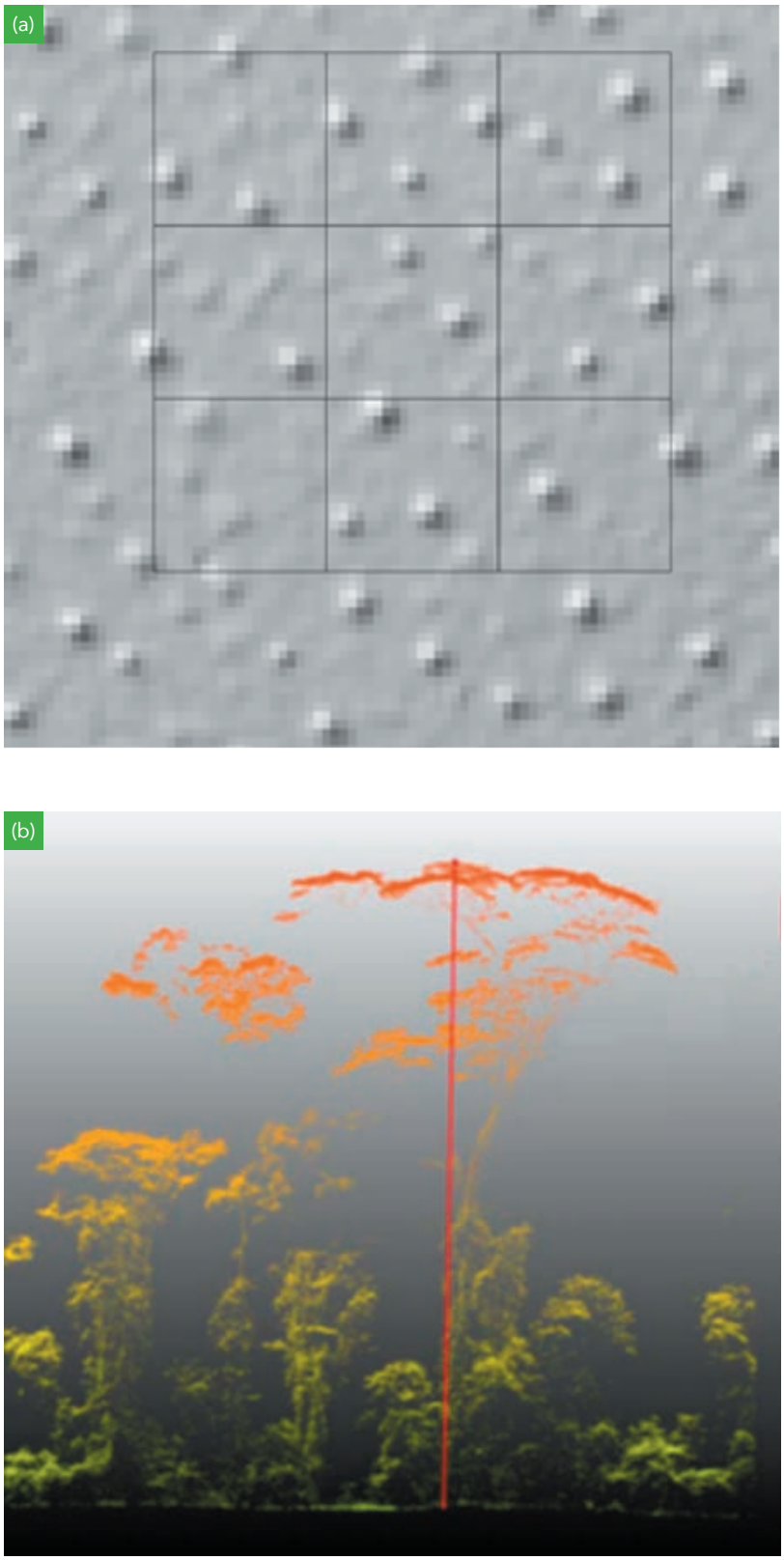


Fig. 27. *Exemples d'exploitation des données LiDAR (a) MNT sur la parcelle n°2 du bloc ouest du dispositif de Loundoungou faisant apparaître les termitières. (b) Dabéma dominant le dispositif de Loundoungou (64,5 m). (© N. Barbier)*

Le drone se place ainsi comme un outil d'avenir dans les activités de recherche forestière ou de planification et de suivi des opérations d'exploitation.

5. LA MOBILISATION ET LA FORMATION DES ACTEURS

5.1 UNE FORTE INTERACTION CRÉÉE AVEC LES PARTENAIRES LOCAUX

Dès le début du projet, un comité de pilotage représentatif des parties prenantes de la région a été installé sous l'égide de la COMIFAC. Ce comité de pilotage a été alimenté en décisions à prendre par un comité scientifique et technique (CST). L'ambition de pérenniser ces instances dans le cadre d'un programme régional sur l'étude de la dynamique des forêts d'Afrique centrale a vu le jour. Depuis 2014, quatre comités de pilotage ont ainsi été organisés dans les différents pays du projet. Le premier a eu lieu en mai 2015 à Yaoundé, le second en juin 2016 à Libreville, le troisième en novembre 2017 de nouveau à Yaoundé, et le quatrième à Bangui, en novembre 2018.

Les relations entre le CIRAD, Gembloux Agro-Bio Tech, les organismes de recherche et les universités d'Afrique centrale ont permis des collaborations sur de nombreuses études. De plus, DynAfFor a initié la création du **« Réseau de Recherche sur les Forêts d'Afrique centrale »** (R2FAC), réseau comptant 10 institutions de recherche et d'enseignement supérieur de la région – ceux qui forment le CST – et quatre institutions du nord ou internationales dont le CIRAD et Gembloux Agro-Bio Tech. L'objectif du R2FAC est de contribuer, par des activités de recherche et de développement, à la gestion durable de l'environnement et des écosystèmes forestiers d'Afrique centrale.

5.2 DES ÉQUIPES DE TERRAIN ET DE NOMBREUX ÉTUDIANTS FORMÉS AUX INVENTAIRES ET À L'UTILISATION DES DONNÉES

Le réseau des dispositifs DynAfFor a permis de former aux méthodes d'inventaire, à la dendrométrie et à la botanique de nombreux étudiants de Gembloux Agro-Bio Tech, de l'USTM (Université de Franceville, Gabon), de l'ERAIFT (Ecole Régionale d'Aménagement et de gestion Intégrée des Forêts et Territoires tropicaux, RDC), de l'Université de Dschang (Cameroun), de l'ENEF et de l'Université de Kisangani (RDC) lors de cours et de séances de travaux pratiques sur le terrain. Il a aussi permis d'accueillir plusieurs chercheurs confirmés ou doctorants de nombreuses universités nationales et internationales. On peut estimer à 250 le nombre d'étudiants et de chercheurs concernés. Par ailleurs, les équipes de recherche des sociétés forestières ont été formées au suivi rigoureux des dispositifs de terrain, à la gestion des bases de données et à leur analyse. Nous estimons à une centaine le nombre d'employés concernés

5.3 DE NOMBREUX GESTIONNAIRES FORMÉS À L'UTILISATION DU LOGICIEL DAFSIM

Les modèles matriciels de dynamique forestière conçus dans le cadre de DynAfFor, appelés de façon générique DafMod, ont été codés pour constituer le moteur d'un simulateur d'exploitation forestière, le logiciel DafSim. DafSim a été développé grâce à un partenariat entre le CIRAD et l'Université de Yaoundé I : deux étudiants en master 2 de la Faculté des Sciences et trois élèves ingénieurs de 5ème année du département de Génie informatique de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique ont consacré leur stage de fin d'études au développement de ce logiciel.

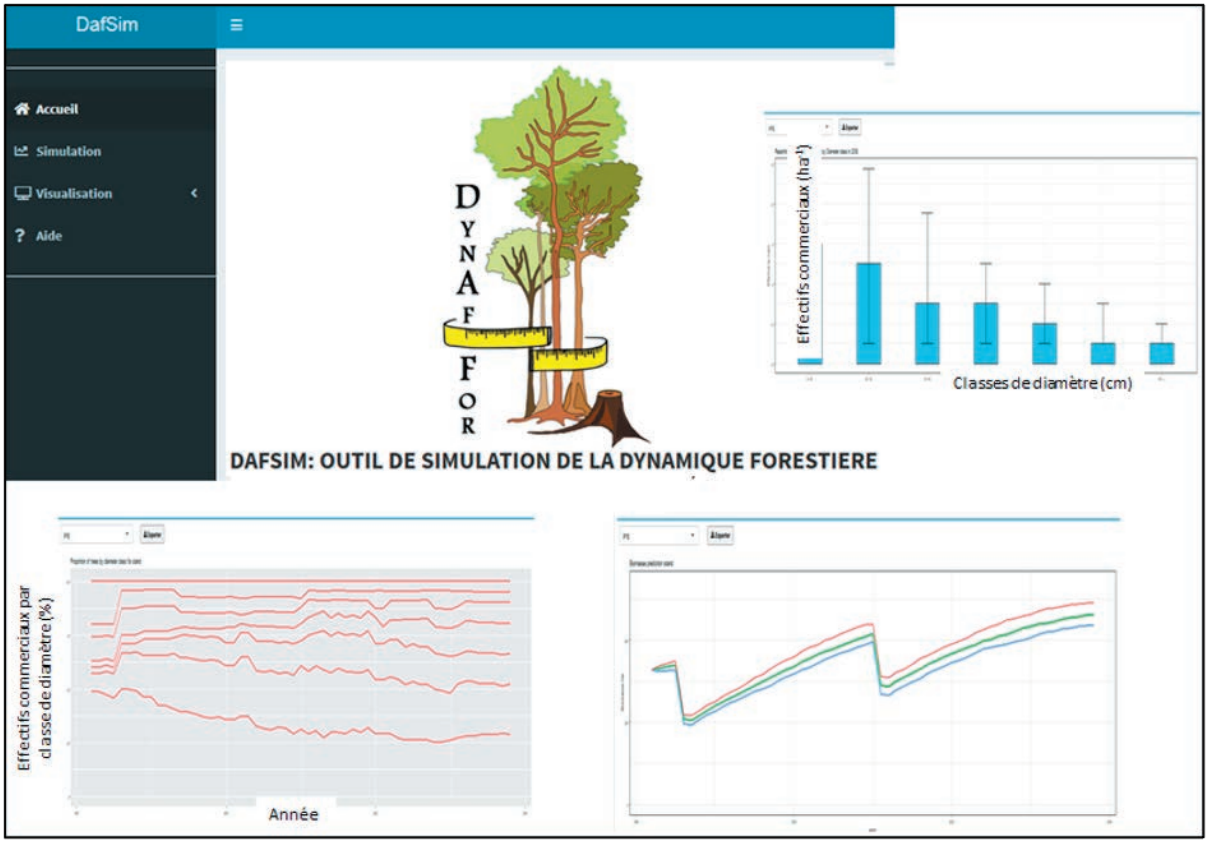


Fig. 28. *Interface d'entrée de DafSim et exemple de graphiques sortis des simulations*

DafSim permet d'explorer différents scénarios d'exploitation (durée de rotation, diamètre minimum d'aménagement ou DMA[26], intensité d'exploitation) et de visualiser leurs impacts sur la reconstitution du stock exploitable de bois commercial : ce stock exploitable correspond à l'effectif total, ou au volume total des arbres de diamètre supérieur ou égal au DMA. Ainsi, le logiciel permet de mieux appréhender le concept de durabilité sous-jacent aux plans d'aménagement, ainsi que les limites des règles en vigueur dans les lois forestières.

Afin que les résultats du projet DynAfFor soient appropriés par les parties prenantes de la gestion forestière, à savoir les ministères des forêts et de l'environnement, les concessionnaires forestiers et les institutions scientifiques nationales (universités, centres de recherche), une série d'ateliers de formation au logiciel DafSim ont été organisés (Tableau 4).

Les participants ont pu tester différents scénarios d'exploitation et comparer leurs impacts sur la reconstitution du stock exploitable. Mais surtout, ils ont réalisé qu'une partie des connaissances nécessaires pour faire des prévisions fiables ne sont pas disponibles et que les valeurs par défaut utilisées ne sont pas toujours pertinentes : **des sentiers et des parcelles permanentes manquent dans les concessions forestières.**

D'une manière générale, ces ateliers ont permis des échanges très constructifs avec les participants autour de la notion de durabilité de l'exploitation forestière. Les travaux pratiques avec le logiciel DafSim leur ont permis de bien appréhender le concept.

26. Diamètre minimum d'aménagement : diamètre supérieur ou égal au DME, fixé dans chacun des plans d'aménagement.

Tableau 4. *Liste des formations au logiciel DafSim*

DATE	PAYS	VILLE	PARTICIPANTS
27/04/18	Cameroun	Yaoundé	**Administration :** Ministère de l'Environnement, Secrétariat Technique REDD+, Ministère des Forêts et de la Faune, Agence Nationale d'Appui au Développement Forestier, projet ProPFE, Réserve du Dja **Etablissements académiques :** Université de Yaoundé I, Université de Buéa, RIFFEAC **Compagnies forestières :** ALPICAM, GRUMCAM, PALLISCO, CUF, SEFECCAM / SIENCAM, WIJMA / CAFECO. **Bureaux d'étude :** ONFi, FRMi **Organisation régionale :** COMIFAC
30/04/18	RCA	Bangui	**Administration :** Ministère de l' Environnement, Ministère des Eaux, Forêts, Chasses et Pêche, Agence de Gestion Durable des Ressources Forestières **Etablissements académiques :** Université de Bangui, Institut Centrafricain de Recherche Agronomique, Institut Supérieur de Développement Rural **Compagnies forestières :** TIMBERLAND, CENTRABOIS, SEFCA, IFB, SINFOCH, TBCA **ONG :** WWF, APDF
31/05/18	Congo	Brazzaville	**Administration :** Ministère de l'Economie Forestière, Centre National des Inventaires et Aménagements Forestiers et Faunique, CLFT-APV-FLEGT **Etablissements académiques :** Université Marien Ngouabi, Institut National de la Recherche Forestière **Bureaux d'étude :** FRMi
04/06/18	Congo	Pointe Noire	**Administration :** Ministère de l'Economie Forestière, CLFT APV-FLEGT **Compagnies forestières :** Afriwood, TAMAN **Bureaux d'étude** : GTGC
19/03/19	RDC	Kinshasa	**Administration :** Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, DIAF, projet AGEDUFOR (AFD), Système National de Surveillance des Forêts (FAO) **Etablissements académiques :** Université de Kinshasa, ERAIFT, Institut National d'Etudes et de Recherches Agronomiques **Compagnies forestières :** SODEFOR, CFT, IFCO
22/05/19	RDC	Kisangani	**Administration :** Coordination Provinciale de l'Environnement, projet AGEDUFOR **Etablissements académiques :** Université de Kisangani **Compagnies forestières :** CFT
18/09/19	Gabon	Franceville	**Etablissements académiques :** Institut National d'Agronomie et de Biotechnologies, Université des Sciences et Techniques de Masuku
20/09/19	Gabon	Libreville	**Administration :** Agence d'Exécution de la Filière Forêt-Bois, Agence Nationale des Parcs Nationaux **Etablissements académiques :** Institut de Recherche en Ecologie Tropicale, Centre national de la Recherche Scientifique et Technologique **Compagnies forestières :** PW-CEB, Rougier, EGG, UFIGA **Bureaux d'étude :** GFEC, TEREA, SYLVAFRICA
23/01/20	Congo	Pokola	**Compagnies forestières :** CIB-OLAM, Mokabi S.A., SEFYD, SIFCO, STC

6. LEÇONS APPRISES ET PERSPECTIVES

Le projet DynAfFor était ambitieux, son intérêt et son importance ont été reconnus par ses bailleurs de fonds dont le FFEM, ses partenaires, et par les experts l'ayant évalué. Le suivi des dispositifs existants, la mise en place des nouveaux dispositifs et leur suivi, les analyses comparatives réalisées sur de nombreux sujets, les travaux publiés, les étudiants formés, l'appel à des instruments et des méthodes innovantes, toutes ces activités ont été jugées de très bon niveau lors des comités de pilotage annuels du projet et en présence de responsables des institutions, du secteur privé et des organisations scientifiques.

Les leçons apprises nous permettent aujourd'hui de formuler un certain nombre de recommandations.

6.1 DES RECOMMANDATIONS CONCRÈTES À APPLIQUER

Les recommandations concrètes qui suivent devraient être considérées par les administrations en charge des forêts dans les pays ayant porté ce projet, et intégrées dans les directives nationales relatives à leur gestion.

6.1.1 Des diamètres minima d'exploitation écologiquement adaptés et uniformisés à l'échelle sous-régionale

En considérant les travaux sur la phénologie et les flux de gènes réalisés dans les dispositifs du réseau DynAfFor, une adaptation des DME et leur uniformisation au niveau régional est suggérée. D'un point de vue commercial cela permettrait de réduire les concurrences entre pays et d'un point de vue écologique, cela permettrait de maintenir un nombre suffisant de semenciers. Les DME proposés sont issus des observations suivantes : (i) le diamètre médian des arbres produisant plus de 50 % des plantules de la population (calculé sur base des études génétiques) est généralement de 20 cm supérieur au diamètre de fructification efficace (ou DF, voir § 4.2.2.), (ii) le diamètre de fructification régulière est généralement supérieur de 10 cm au diamètre de floraison efficace. Les diamètres de fructification et de floraison sont issus des observations réalisées dans le réseau DynAfFor ainsi que des travaux de Ouedraogo et al. (2018) et de Doucet (2003).

Le Tableau 5 synthétise les recommandations. En fonction des espèces et des pays, des relèvements ou abaissements des DME sont proposés. Les DME de l'Ayous, du Kosipo et du Sipo devraient être revus à la hausse dans tous les pays. A l'inverse, ceux de l'Iroko ou du Padouk pourraient être diminués dans plusieurs pays. Le DME a été plafonné à 100 cm car aller au-delà ne paraît pas réaliste en raison des contraintes économiques. Pour le Moabi, le Kosipo et l'Ayous, la préservation de semenciers supplémentaires ou la mise en œuvre de techniques d'appui à la régénération, afin de garantir le maintien des populations sur le long terme, est recommandée.

Par ailleurs, les observations faites à partir des collectes de graines dans les sociétés disposant d'une pépinière permettent de préconiser des DME ne descendant pas en-dessous des valeurs suivantes : 100 cm pour le Mukulungu, 80 cm pour le Dibétou et 60 cm pour le Pao rosa. Ces valeurs ont été calculées sur base du diamètre médian des arbres approvisionnant les pépinières.

Tableau 5. *DME (en cm) des espèces commerciales dont la phénologie et/ou les flux de gènes ont été étudiés dans les dispositifs DynAfFor. Les valeurs en rouge sont inférieures au DME proposé, celles en vert sont conformes et celles en bleu supérieures.*

Nom commercial	Gabon	Congo	Cameroun	RDC	RCA	Recommandé
Acajou d'Afrique	80	80	80	80	80	80
Afrormosia	-	60	90	60	80	80
Aniégré	70	60	60	60	70	70
Ayous	-	70	80	80	60	100
Azobé	80	70	60	60	70	70
Bété	-	-	60	-	-	60
Bossé clair	60	60	80	60	70	70
Ebène noir	40	40	60	50	40	50
Eyong	70	60	50	-	70	50
Fraké	70	60	60	60	60	60
Ilomba	70	60	60	80	80	70
Iroko	80	70	100	80	70	70
Kosipo	90	80	80	80	80	100
Lotofa	-	-	50	-	-	60
Moabi	-	80	100	-	80	100
Movingui	70	50	60	-	-	70
Niangon	60	-	50	-	-	80
Niové	60	40	50	60	50	50
Okan	70	60	60	-	-	80
Okoumé	70	70	80	-	-	70
Ossabel	60	60	-	-	-	60
Ovengkol	70	-	80	-	-	70
Ozigo	-	60	50	60	-	60
Padouk	80	80	60	60	60	60
Sapelli	90	80	100	80	80	90
Sipo	90	80	80	80	80	100
Sorro	60	-	50	-	-	70
Tali	70	60	50	50	80	80
Tiama	80	80	80	80	80	80
Tola	80	80	100	80	90	80
Wengé	60	60	50	60	70	60

6.1.2 Des règles strictes sur les semenciers et des normes améliorées de gestion de la faune

Sans semencier, il n'y a pas de régénération naturelle en forêt. Dans de nombreux pays tropicaux, des taux de prélèvement maximum d'arbres exploitables limitent l'impact de l'exploitation sur la population de semenciers : de 80-90% dans divers pays d'Amérique latine, à 50% au Ghana, par exemple. Les pays d'Afrique centrale devraient aussi adopter des limitations des taux de prélèvement pour une meilleure préservation des semenciers. Un minimum de 10% de préservation des arbres exploitables serait souhaitable, particulièrement pour des espèces telles que l'Ayous, le Kosipo et le Moabi (voir § 6.1.1) et les espèces dont le diamètre de fructification est encore inconnu (voir § 4.2.2). Ces semenciers doivent être bien répartis sur le site exploité et dans les différentes classes de diamètre.

Le Tableau 2 (§ 4.2.2) fournit les diamètres de fructification d'importantes espèces exploitées, et peut servir de guide pour l'identification des semenciers. Rappelons que les semenciers les plus efficaces ne sont pas ceux dont les diamètres sont les plus élevés, mais se trouvent dans les classes de diamètre intermédiaires. Ces semenciers doivent également être des arbres affichant de bonnes conformations (fût rectiligne, cylindrique et dépourvu de branches basses) et sans défauts sanitaires. Des critères supplémentaires sont à considérer lorsqu'on collecte des semences dans le but de créer des plantations d'arbres : les semenciers récoltés doivent être identifiés dans les forêts naturelles et être distants les uns des autres d'au moins 200 m. Ils ne doivent pas provenir de plantations d'origine inconnue. A terme, des programmes d'identification de peuplements à graines naturels, voire de création de vergers à graines, sont souhaitables pour améliorer significativement la qualité des boisements : ces différents aspects sont davantage développés par le projet P3FAC.

Les semenciers n'ont un impact positif et durable sur la régénération naturelle que s'ils dispersent efficacement leurs graines. Or, la dispersion de la majorité des espèces d'arbres de forêt dense tropicale dépend des animaux : la préservation de la faune des concessions exploitées est fondamentale. Les normes de gestion de la faune promues par certains standards de certification comme le FSC ont fait leurs preuves : des niveaux de biodiversité similaires ont ainsi été observés entre concessions exploitées certifiées et aires protégées. De telles normes devraient inspirer les administrations nationales. Le guide de vulgarisation de la gestion de la faune dans les concessions, en cours de production par des membres du collectif DYNAFAC, synthétise les stratégies recommandées.

6.1.3 Des durées de rotation et des taux de reconstitution réalistes

La durabilité suppose que lorsqu'un arbre de diamètre supérieur au DMA est exploité, un autre arbre le remplace au cours de la rotation suivante. Le diamètre minimum que pourrait avoir ce remplaçant en début de rotation dépend de sa croissance, de sa probabilité de mourir, et de la durée de la rotation. En moyenne, une durée de rotation de 30 ans permet à un arbre dont la croissance diamétrique est de 0,5 $cm.an^{-1}$ et la probabilité de mourir très faible de devenir exploitable si son diamètre est de DMA-15 cm en début de rotation. Exploiter durablement nécessite donc que le

nombre d'arbres présents dans la classe de diamètre [DMA-15 ; DMA[soit strictement supérieur au nombre d'arbres exploités au-dessus du DMA, pour tenir compte de la mortalité et des dégâts d'exploitation.

Dans les forêts n'ayant jamais été exploitées auparavant, ce n'est généralement pas le cas sauf dans des situations particulières : des espèces pionnières ou très héliophiles peuvent avoir, dans cette classe, des effectifs très supérieurs à ceux de la classe située au-dessus du DMA comme c'est le cas de l'Okoumé au Gabon et au sud de la République du Congo. La situation est souvent inverse pour de nombreuses autres espèces comme le Sapelli ou le Mukulungu par exemple.

La méthode d'estimation de la croissance des espèces influence les calculs de prévision de la reconstitution des arbres exploités. Chez la grande majorité des espèces suivies sur les sentiers, l'accroissement en diamètre des arbres d'avenir présents dans la classe 40-70 cm est supérieur de 10 à 150% à l'accroissement moyen des arbres tous diamètres confondus, et varie de 0,146 cm.an-1 à Loundoungou (l'Ebène noir) à 0,942 cm.an-1 à Mokabi (le Sapelli) avec un cas exceptionnel qui est celui du Dabéma à Loundoungou, chez lequel l'accroissement atteint 1,464 cm.an-1. Les estimations réalisées sur les classes 40-60 cm ou 50-70 cm modifient peu ces observations. Chez 50 à 70% des espèces suivies dans la plupart des sites, l'accroissement des arbres d'avenir est supérieur à 0,5 cm.an-1 et la reconstitution de leur stock devrait pouvoir se faire si la classe de diamètre [DMA-20 ; DMA[dispose d'environ 1,5 fois l'effectif des arbres exploités. Ce facteur doit bien évidemment être calculé pour chaque espèce.

Si reconstituer 100% d'un stock exploitable est très difficile dans des forêts n'ayant jamais été exploitées auparavant, cette règle devrait être obligatoire à partir de la deuxième rotation. Pour la plupart des peuplements, une durée de rotation de 30 ans paraît être la solution la plus prudente, permettant de reconstituer le stock (présent lors du démarrage de la deuxième rotation) d'un maximum d'espèces, à condition d'adapter soigneusement le prélèvement aux estimations faites par les modèles. Toutefois, dans certains cas particuliers, une rotation plus courte est possible (cas des jeunes forêts à Okoumé). »

Conscients de la difficulté de reconstituer à 100% le stock exploitable de certaines espèces prises individuellement, nous recommandons que cette règle **s'applique au groupe** des espèces commerciales dont une part significative de la population a été exploitée lors de la rotation précédente, **chacune des espèces constituant ce groupe devant avoir reconstitué au minimum 50% de son propre stock.** Par ailleurs, **l'ensemble des espèces n'ayant pas (ou peu) été exploitées lors de la rotation précédente doit être affectée à un nouveau groupe, différent du précédent, et se voir appliquer la même règle :** stock exploitable du groupe reconstitué à 100% au bout de la 2ème rotation, et celui de chacune des espèces au minimum à 50%. **La notion de bonus, telle que définie au Cameroun, doit être abandonnée, les effectifs à reconstituer devant être tous ceux présents au-dessus du DMA.**

Par ailleurs, **une réflexion est en cours sur l'intégration de l'incertitude dans les estimations des taux de reconstitution du stock dans les plans d'aménagement.**

Le Tableau 6 rassemble les estimations de la croissance réalisées pour les espèces commerciales suivies dans les différents sites, et qui devraient être prises en compte dans les calculs de taux de reconstitution dans les concessions de la région.

	Bambidie (2015 - 2018)*			**Djoum** (2015 - 2017)			**Loundoungou** (2015 - 2019)			**Ma'an** (2011 - 2017)*		
Espèce	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})
Acajou d'Afrique												
Aiélé							25	0,711	0,492			
Afrormosia												
Ayous										60	0,415	0,337
Azobé							14	0,668	0,419	63	0,572	0,252
Béli	66	0,882	0,601									
Bété												
Bilinga							18	0,519	0,421			
Bossé clair							29	0,686	0,406			
Dabéma				26	0,778	0,607	58	1,464	0,529	60	1,011	0,804
Dibétou							11	0,667	0,413	53	0,786	0,544
Doussié							13	0,339	0,255			
Ebène noir							67	0,146	0,217			
Etimoé							25	0,870	0,442			
Eyong				*9*	*0,473*	*0,364*	74	0,383	0,338			
Fraké				66	0,268	0,452						
Iatandza							28	0,632	0,409			
Ilomba							164	0,762	0,514			
Iroko												
Kosipo							44	0,665	0,416			
Kotibé							137	0,181	0,188			
Lati 1							70	0,632	0,498			
Longhi abam							34	0,584	0,450			
Longhi beguei												
Lotofa												
Moabi				*9*	*0,965*	*0,451*						
Movingui	60	0,286	0,253	53	0,480	0,304				63	0,487	0,330
Mukulungu							13	0,497	0,303			
Niové				55	0,277	0,317	120	0,362	0,310			
Okan	*9*	*0,604*	*0,286*	35	0,389	0,334				38	0,911	0,484
Ossabel	57	0,473	0,335									
Otungui	20	0,382	0,274	24	0,248	0,155	110	0,195	0,152			
Owom							214	0,414	0,282			
Padouk	26	0,642	0,408	43	0,480	0,407	141	0,468	0,351	58	0,430	0,318
Pao rosa							*9*	*0,324*	*0,226*			
Sapelli							96	0,812	0,427			
Sipo							17	0,807	0,268			
Tali	22	0,340	0,235	48	0,554	0,443	127	0,550	0,411	60	0,599	0,392
Tchitola												
Tiama							52	0,578	0,360			
Wamba							136	0,522	0,329			

Tableau 6. *Accroissements moyens annuels des arbres d'avenir des différentes espèces suivies sur les sentiers témoins des sites DynAfFor. Le diamètre de ces arbres est compris dans l'intervalle [40 cm - 70 cm[. Sur chaque site, pour chaque espèce, les accroissements sont associés à l'effectif des arbres suivis, et à leur écart-type. Accroissements et écart-types calculés ont été pondérés par le nombre d'années écoulées durant lesquelles chaque arbre a été suivi : plus ils ont été suivis longtemps, plus les valeurs moyennes des accroissements sont fiables. Il est recommandé d'être très prudent lorsque les effectifs suivis sont inférieurs à 10. Pour information, deux des espèces listées, l'Ilomba et le Sapelli, ont été suivies durant longtemps sur les 12 ha des parcelles témoins du site de M'Baïki. Les effectifs limités de ces espèces (resp. 6 et 7 arbres appartenant à l'intervalle [40 cm - 70 cm[) sont compensés par la longueur de la période durant laquelle ils ont été suivis. Les accroissements moyens et les écart-types pondérés sont les suivants : 0,375 cm.an-1 (± 0,051 cm.an-1) et 0,710 cm.an (± 0,476 cm.an-1), calculés sur la période 2008-2019. Une période plus longue est disponible, mais plus difficile à comparer aux données des sentiers étant donnée l'évolution des conditions climatiques).*

** Certaines espèces ont été inventoriées sur un temps plus court*
*** Les données issues des parcelles ont été ajoutées à celles issues des sentiers, suivis de 2016 à 2017*

	Mamfe (2011 - 2016)*			**Mbang** (2009 - 2016)*			**Mindourou** (2013-2019)*			**Mokabi** (2015 - 2018)**		
Espèce	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})	N	ΔD moyenne (cm.an^{-1})	SD pondéré (cm.an^{-1})
Acajou d'Afrique	33	0,598	0,365									
Aiélé												
Afrormosia				70	0,429	0,153	76	0,275	0,144			
Ayous				62	0,581	0,417	12	1,169	0,514			
Azobé	60	0,516	0,382				30	0,519	0,241			
Béli												
Bété				57	0,263	0,165	60	0,618	0,278			
Bilinga												
Bossé clair												
Dabéma												
Dibétou												
Doussié							30	0,295	0,198			
Ebène noir										44	0,228	0,213
Etimoé										*7*	*0,884*	*0,259*
Eyong												
Fraké				54	0,169	0,184	72	0,384	0,384			
Iatandza												
Ilomba										117	0,504	0,364
Iroko												
Kosipo							15	0,709	0,505	52	0,645	0,385
Kotibé										73	0,295	0,258
Lati 1										70	0,937	0,825
Longhi abam												
Longhi beguei										13	0,435	0,277
Lotofa				65	0,482	0,240						
Moabi												
Movingui	62	0,216	0,190									
Mukulungu										*7*	*0,158*	*0,248*
Niové										86	0,265	0,374
Okan	51	0,836	0,495				32	0,824	0,451			
Ossabel												
Otungui	*7*	*0,317*	*0,188*	20	0,353	0,309	24	0,277	0,124	96	0,208	0,147
Owom										190	0,422	0,410
Padouk	72	0,519	0,321	26	0,939	0,405	80	0,519	0,321	111	0,463	0,447
Pao rosa												
Sapelli				45	0,654	0,362	61	0,758	0,376	89	0,942	0,452
Sipo							*7*	*1,024*	*0,463*			
Tali				85	0,420	0,276	66	0,383	0,310	112	0,668	0,502
Tchitola										91	0,524	0,607
Tiama										100	0,582	0,546
Wamba										142	0,604	0,530

Une dernière question se pose sur la variable à utiliser pour vérifier qu'un stock exploitable est reconstitué : faut-il se baser sur un effectif d'arbres, ou bien sur un volume ? Si l'on cherche à privilégier la durabilité écologique de l'aménagement, la priorité doit être mise sur les effectifs afin de garantir le maintien minimum de la diversité génétique des populations. Si l'on cherche à privilégier la durabilité économique (théorique ?) de l'aménagement, la priorité doit être mise sur le volume exploité. Notre recommandation est de privilégier la durabilité écologique. A l'issue d'une rotation, l'effectif d'arbres présents au-dessus du DMA doit servir de base de calcul pour viser une reconstitution à 100% des effectifs au bout de la 2ème rotation. En toute logique, le volume atteint sera alors également très proche d'une reconstitution à 100%, compte-tenu de l'homogénéisation probable de la structure diamétrique des arbres localisés au-dessus du DMA.

6.1.4 La nécessité d'appuyer la régénération naturelle

Outre parfois des caractéristiques démographiques particulières ayant provoqué un déficit naturel de régénération, les pratiques d'exploitation passées ou actuelles ont pu entraîner une réduction progressive du stock exploitable de bois commercialisable dans les concessions. Pour les espèces héliophiles, la mise en œuvre de techniques de régénération naturelle assistée, permettant d'optimiser les conditions de développement de la régénération naturelle, pourrait être une voie relativement peu coûteuse d'accroissement des stocks futurs sur le long terme. Ces techniques sont toutefois moins bien documentées en zone de forêt dense humide que dans les zones plus sèches où elles ont été traditionnellement pratiquées. L'enrichissement à base d'espèces locales paraît une option plus indiquée en forêt dense humide. La diversité des espèces d'arbres présentes ne facilite pas la maîtrise d'itinéraires sylvicoles spécifiques, mais l'accumulation d'expérimentations menées au cours des dernières décennies permet aujourd'hui d'élaborer des programmes d'enrichissement viables et intéressants sur le plan socio-économique. L'approfondissement de ces démarches ainsi que la compilation des connaissances accumulées font partie des aspects traités par le projet P3FAC. Un guide technique d'enrichissement dédié aux espèces de forêt dense humide d'Afrique centrale est en cours de rédaction par des membres du collectif DYNAFAC. Il décrit les étapes techniques et le coût financier d'un programme de plantation d'arbres et sera disponible en début d'année 2021.

6.1.5 Des sentiers indispensables, à rendre obligatoires dans les grandes concessions

Les résultats actuellement disponibles sur l'accroissement en diamètre et le taux de mortalité des principales espèces suivies ne permettent pas de conclure sur l'homogénéité de la dynamique démographique au sein des types forestiers. Ainsi qu'expliqué au § 4.2.1, les facteurs explicatifs des différences entre sites - que les sites soient situés ou non dans le même type forestier - ne sont pas uniquement liés au climat et au sol : l'optimum écologique de l'espèce, le pool génétique représenté, les caractéristiques de l'environnement local et l'historique du site ont également une influence sur la dynamique. Pour ces raisons et en attendant des résultats à plus long terme, il est recommandé que chaque concession de superficie supérieure ou égale à 50 000 hectares installe et suive au moins un sentier, afin de quantifier croissance et mortalité des espèces dans des conditions aussi représentatives que possible de celles rencontrées dans la concession. Le sentier devrait être installé dans une zone « témoin », c'est-à-dire n'ayant pas encore fait l'objet d'une exploitation ou, à défaut, dans une zone exploitée depuis une vingtaine d'années et au minimum 5 ans avant une nouvelle exploitation. Les concessions de superficie inférieure à 50 000 ha, situées autour de celle-ci et sur une zone écologiquement semblable, devraient alors s'appuyer sur les résultats issus de ce sentier pour estimer la reconstitution de leur stock exploitable sur la durée d'une rotation. Cette recommandation ne peut évidemment avoir de sens que si l'obligation réelle d'installer des sentiers sur les concessions de taille suffisante est imposée et respectée.

Ces recommandations devraient faire l'objet de dispositions légales à l'échelle des Etats.

Le guide méthodologique d'installation et de suivi des sentiers, récemment paru avec la participation de membres du collectif DYNAFAC, décrit en détail les procédures d'estimation de l'accroissement en diamètre et du taux de mortalité (Tosso *et* al., 2020). Le suivi de 6 à 10 espèces choisies parmi les plus exploitées par le concessionnaire, en ciblant pour chaque espèce 20 arbres par classe de diamètre, génère des coûts d'installation qui s'élèvent de 8,3 à 12 millions FCFA selon le pays et la démarche choisie (approche pragmatique *vs* approche exhaustive).

6.1.6 Un réseau régional de dispositifs complets à mettre en place et à préserver

Comme évoqué au § 3.1, certains types forestiers d'Afrique centrale, comme les forêts sempervirentes atlantiques et les forêts sempervirentes et sempervirentes mixtes du centre et du sud de la République Démocratique du Congomanquent de dispositifs. Des dispositifs complets comme ceux installés au nord de la République du Congo devraient l'être au minimum dans les différents types forestiers les plus répandus dans chacun des pays (voir Fig.4) : au moins un dans les types 6 et 10 du Cameroun, un dans les types 1, 2, 3 et 8 du Gabon, un dans les types 1 et 10 de la République du Congo, un dans les types 8 et 10 de la République démocratique du Congo. Dans le type 7, particulièrement étendu dans ce pays, ce sont au minimum deux dispositifs complets qui devraient être installés et le dispositif de Yoko renforcé par un nouveau bloc et par des sentiers. En République centrafricaine, le dispositif de M'Baïki devrait être renforcé par des sentiers.

A l'origine du projet, le choix a été fait de travailler directement avec des compagnies forestières, gage d'une plus grande sécurisation des dispositifs. Ce choix a reposé sur l'expérience accumulée par les partenaires de DynAfFor sur les dispositifs préexistants dans la région, et les premières négociations engagées avec des compagnies particulièrement intéressées et prêtes à s'investir. Ce choix était également cohérent avec celui fait par l'administration forestière de certains des pays de la région d'imposer la mise en place de dispositifs de ce type dans les concessions forestières et à la charge des sociétés.

La mise en œuvre du projet a fait surgir les limites de ce choix, liant la viabilité des dispositifs à celle des sociétés qui les hébergent. Sur les 10 sites du réseau DynAfFor, quatre n'ont pas pu être suivis comme initialement prévu, certaines compagnies ayant remis leur concession à l'Etat ou s'étant déclarées en faillite (sites de Djoum, Mbang, Ma'an et Mokabi).

Atténuer ce risque nécessite au minimum une reconnaissance de l'intérêt des dispositifs au niveau national. En toute logique et quel que soit l'endroit où ils sont installés, de tels dispositifs devraient être en partie financés par les pouvoirs publics, pour en garantir le suivi sur le long-terme. La cogestion par un système national de recherche et un partenaire privé, permettrait de mieux assurer un suivi fréquent (cf. § 2.3).

Cependant, installer des sites en-dehors des concessions forestières et sous la co-responsabilité d'administrations nationales présente également des limites : ainsi le site de Yoko, dont l'installation

a démarré en 2008, en partenariat avec l'Université de Kisangani n'a pu être installé de façon complète et dépend entièrement des financements obtenus dans le cadre de projets portés par des partenaires étrangers. Un bel exemple de réussite reste, cependant, le dispositif historique de M'Baïki, porté à la fois par l'administration, l'université de Bangui, une compagnie forestière et un partenaire européen, grâce à un appui financier de l'AFD mais grâce également à un investissement régulier de l'état centrafricain : ce système mixte, associant l'ensemble des acteurs semble être la meilleure stratégie à adopter. Il pourrait être tenté, en particulier, en République Démocratique du Congo en s'appuyant sur le parc national de la Salonga et le paysage CARPE "Salonga-Lukenie-Sankuru".

Faire reconnaître le réseau des dispositifs au niveau international, en s'appuyant sur la signature de conventions avec des utilisateurs de données au niveau régional (COMIFAC, PFBC) ou mondial (agences spatiales), ou en s'associant avec d'autres réseaux travaillant sur différents continents comme TmFO, RAINFOR, AfriTRON, T-Forces, pourrait aider à la sécurisation de moyens de fonctionnement à plus long terme. Cela pourrait également favoriser l'obtention de nouveaux financements permettant d'étendre le réseau.

6.2 SE FAIRE CONNAÎTRE ET RECONNAÎTRE

6.2.1 Mobiliser les administrations forestières nationales

Les travaux réalisés dans le cadre de DynAfFor se sont en grande partie appuyés sur les compagnies forestières, l'information des équipes de direction et la formation des équipes de terrain. Ils ont également mobilisé de nombreux chercheurs et étudiants et leurs résultats ont alimenté des cours délivrés dans plusieurs universités de la région.

La mobilisation des administrations forestières s'est révélée plus compliquée : des représentants de tous les pays ont été systématiquement invités à participer aux ateliers régionaux annuels tenus par le projet, mais ces représentants n'étaient pas toujours les mêmes. Ils ont également été invités à la plupart des ateliers de formation au logiciel DafSim (Tableau 5), mais ils y ont été très peu nombreux. Le constat global, clairement fait par l'équipe d'évaluation du projet, est que le projet DynAfFor est resté peu ou pas connu du personnel administratif.

La collaboration avec les administrations de la région nécessite donc d'être encore renforcée, par l'information et la formation de leurs représentants, non seulement à travers des ateliers mais également par des participations à des activités de terrain. Des visites régulières auprès des points focaux de la COMIFAC ainsi que de toute personne ressource identifiée au sein de ces administrations devraient être réalisées. Les instituts de recherche nationaux devraient également être des leviers sur lesquels s'appuyer davantage. Enfin, un renforcement du comité de pilotage par des représentants influents des administrations pourrait faciliter la transmission du message des scientifiques aux hautes instances politiques.

6.2.2 Communiquer de manière efficace

Il n'avait pas été prévu de volet « Communication » à la conception du projet et la prise de conscience de l'importance de la communication à un plus large public est apparue plus tardivement, au fur et à mesure de l'obtention de résultats et de leur valorisation par des publications. Le constat a été fait à ce moment qu'une communication efficace devait être réalisée par des professionnels et que la définition d'une stratégie de communication dans toutes ses composantes aurait été nécessaire.

Fin 2018, le projet DynAfFor s'est donc doté d'un axe « Communication et Capitalisation » en vue de mobiliser les parties prenantes d'Afrique centrale autour des résultats de la recherche. L'une des premières décisions prises a été de créer le collectif « Dynamique des Forêts d'Afrique centrale » (DYNAFAC). Ce collectif est conçu pour fédérer autour du réseau de sites et de dispositifs permanents l'ensemble des partenaires investis dans la gestion des forêts de la région, et pour s'inscrire dans la durée, au delà du projet DynAfFor, tel un fil conducteur entre projets complémentaires permettant d'assurer la capitalisation des expériences acquises au fil des années.

Pour assurer la communication du DYNAFAC, des outils de communication (logo, flyers, plaquettes roll-up et un site internet) ont été réalisés. Une communication sur les réseaux sociaux (Instagram, Facebook et Twitter) est également assurée. Des documents de vulgarisation des résultats, adaptés aux publics cibles ont également été produits (voir site internet DYNAFAC https://www.dynafac.org/fr/media

6.2.3 Rien ne sert de produire des connaissances si elles ne sont pas utilisées

Dans les différents pays d'Afrique centrale, les connaissances sont régulièrement améliorées dans le domaine de l'aménagement et de l'exploitation durables des massifs forestiers et le projet y a significativement contribué. La finalité est que ces données récentes et consolidées sur l'écologie et la dynamique de population des espèces exploitées permettent d'améliorer la durabilité des aménagements forestiers.

Cependant, ces connaissances sont à l'heure actuelle encore trop peu prises en compte dans les plans d'aménagement et les réglementations forestières des pays d'Afrique centrale. Bien que conscientes de l'importance que revêt la prise en compte de ces nouvelles connaissances pour le maintien de leurs massifs forestiers, les administrations nationales sont dépourvues de structures institutionnelles permettant leur capitalisation avec l'ensemble des parties prenantes concernées. Il apparaît donc essentiel d'appuyer les administrations pour que ces nouvelles informations soient régulièrement intégrées dans les législations nationales.

Le projet DynAfFor a accompagné la mise en place d'une telle structure au Cameroun : le Conseil Scientifique Consultatif. Composé de l'ensemble des parties prenantes de la gestion forestière, et présidé par le ministère chargé des forêts, il a pour mission d'analyser périodiquement les nouveaux résultats de la recherche et d'en tenir compte pour proposer des modifications des textes régissant la gestion forestière. Une initiative de ce type devrait être étendue à l'ensemble des pays de la région.

6.3 PERSPECTIVES : LES NOUVEAUX DÉFIS À RELEVER

6.3.1 De nouveaux plans d'aménagement plus exigeants sous contrôle renforcé

Nous nous trouvons actuellement à un tournant pour ce qui est de l'avenir des plans d'aménagement des forêts de production de la sous-région. Les premiers plans d'aménagement arrivent à échéance (§ 1) et une phase de première révision a démarré, au moment où plusieurs pays intègrent dans leurs nouveaux codes forestiers l'obligation d'une certification de gestion des concessions.

Le nouveau code forestier du Congo, promulgué le 8 juillet 2020, prévoit en ses articles 72 et 257 l'obligation pour l'ensemble des opérateurs privés forestiers d'obtenir une certification tierce partie auditée. Le Gabon a aussi fait preuve d'innovation en 2019, en signifiant aux concessionnaires forestiers l'obligation d'être certifiés "gestion durable" à l'horizon 2022 : cela laisse entrevoir que les règles de gestion des concessions forestières devront devenir conformes à celles imposées par les schémas de certification de gestion durable. De telles dispositions ne paraissent cependant pas encore à l'ordre du jour dans les autres pays d'Afrique centrale, et se heurtent d'ailleurs à des difficultés, autant d'ordre pratique (moyens à mobiliser pour mener toutes les entreprises vers la certification dans un laps de temps assez court) que juridiques (un certificat privé qui conditionnera la validité d'un contrat signé avec l'Etat).

Aujourd'hui, un certain nombre de problèmes se posent encore, et montrent qu'une évolution qualitative des plans d'aménagement est possible et nécessaire pour une meilleure prise en compte de la durabilité :

- le calcul de la reconstitution de la ressource présente des approximations et des simplifications dans son mode de raisonnement, dont l'influence n'a été que peu étudiée ;

- les données scientifiques servant de base sont largement incomplètes (peu d'espèces étudiées et représentativité géographique faible) et comportent ainsi des valeurs, parfois par défaut, dont la variation même minime peut avoir des incidences sur la durabilité des populations d'espèces exploitées et des conséquences financières importantes ;

- les plans d'aménagement actuels ne prennent que peu en compte la régénération naturelle, rendant la notion de durabilité à long terme – après la seconde rotation - largement incertaine ;

- le rôle de la faune, essentielle pour la dissémination des graines de nombreuses espèces et les modes de gestion des produits forestiers non ligneux (PFNL) - dont la récolte fait partie des droits d'usage des populations - ne sont pas considérés.

Le projet P3FAC a pris la suite de DynAfFor pour répondre à ces questions, en continuant le suivi des dispositifs installés par DynAfFor, en installant de nouveaux dispositifs, et en élargissant les sujets abordés : les techniques sylvicoles, la régénération, la faune et les produits forestiers non ligneux (fruits, chenilles, graines, écorces, feuilles…).

Mais les efforts à fournir pour appuyer cette évolution générale vers une gestion

plus durable des forêts, devraient aussi mobiliser des compétences complémentaires à celles qui ont été mobilisées dans les projet DynAfFor et P3FAC : celles de sociologues, d'anthropologues, d'économistes, de juristes, de spécialistes des jeux de rôle… Cela demande, très probablement, la conception et le montage de nouveaux projets, en faisant davantage appel à tous les partenaires potentiels dès leur conception.

6.3.2 Vers un changement de paradigme : découpler exploitation et transformation

La très grande majorité des surfaces de forêts de production d'Afrique centrale a déjà été parcourue par une première exploitation. Une bonne partie, essentiellement les forêts « côtières », en est déjà à plusieurs passages. Pour ces forêts, le système de concession intégrant aménagement et industrie n'est souvent plus viable et l'on observe dans certains pays une transition vers une spécialisation des opérateurs.

Une étude prospective récente sur l'industrialisation de la filière-bois en Afrique centrale à l'horizon 2030 (Banque africaine de développement, 2018) constate, au Gabon, une spécialisation des opérateurs forestiers : 1) en amont comme producteurs de grumes et 2) en aval comme industriels de la transformation focalisés chacun sur une gamme plus ou moins large de produits transformés à base de bois, cela suite à l'interdiction de l'exportation des grumes et à la création d'une zone économique spéciale proche du port d'Owando. Le développement d'un marché intérieur de la grume, engendré par ce nouveau contexte, « ouvre de fait l'approvisionnement de chacune des usines de transformation à de multiples sources d'approvisionnement, permettant à la fois la spécialisation de chacune sur certaines essences et […] la possibilité d'augmenter le prélèvement en forêt ». Cette spécialisation dans les métiers de la forêt et de l'industrie du bois s'observe aussi de plus en plus au Cameroun ces dernières années, avec des tentatives d'organisation formelle d'un marché intérieur du bois.

Dans les autres pays d'Afrique centrale, le marché des grumes vers les autres industries (en dehors de celle rattachée à la concession forestière) est presque inexistant, les grumes produites dans les concessions étant transformées dans les usines du concessionnaire. Cette situation représente un facteur de blocage à une valorisation plus poussée de la matière première bois et conduit à réduire le prélèvement en forêt, concentré sur une faible gamme d'espèces.

Ainsi, intégrer l'exploitation et la transformation au sein d'un même opérateur n'a que rarement permis d'atteindre les seuils minimaux de volume pour envisager la transformation et la commercialisation d'espèces de promotion (ou "Lesser Known Timber Species " - LKTS-) et a favorisé un « écrémage » des forêts par l'extraction de quelques espèces phares. Au contraire, le découplage de l'exploitation et de la transformation devrait permettre le développement d'industries spécialisées, assurant la transformation d'un éventail beaucoup plus large d'espèces.

Dans ces conditions, le réseau de dispositifs a un rôle évident à jouer pour mieux connaître la dynamique des espèces de promotion et suivre la dynamique de la forêt après une forte intensité d'exploitation.

6.4 EN BREF...

Depuis une trentaine d'années, l'exploitation industrielle des forêts d'Afrique centrale est régulièrement critiquée. La controverse oppose les partisans d'un arrêt complet de l'exploitation industrielle, car ils la considèrent comme un moteur de déforestation, d'érosion de la biodiversité et de perte du stock de carbone, à ceux qui voient en elle un système complémentaire à la création d'aires protégées pour préserver les forêts et leurs services, moyennant des aménagements durables. C'est avec cette seconde conviction que les recherches du projet DynAfFor ont été menées afin d'améliorer les aménagements forestiers.

Les systèmes de gestion des forêts naturelles évolueront certainement dans les prochaines années, mais les concessions forestières ne disparaîtront pas du jour au lendemain. C'est pourquoi les Etats d'Afrique centrale et les concessionnaires forestiers devront être attentifs à la prise en compte de nos recommandations pour améliorer la gestion de leurs forêts, sous peine de ne plus être crédibles face à la critique des groupes de pression favorables à l'arrêt de l'exploitation industrielle.

Le réseau de dispositifs mis en place par le projet et les résultats fondamentaux obtenus et à venir - meilleure compréhension de la dynamique des forêts soumises à des perturbations et meilleure connaissance des espèces d'arbres les constituant - resteront utiles dans le cadre de l'adoption d'autres systèmes de mise en valeur des forêts, ou lorsqu'il s'agira de développer des programmes de plantations d'espèces locales, où la connaissance des caractéristiques comportementales des espèces à utiliser en fonction des milieux destinés à être plantés, sera essentielle.

ANNEXE - Correspondance entre noms vernaculaires et noms latins

(Pour plus d'informations consulter la "Nomenclature des Bois Tropicaux" éditée par l'ATIBT)

Espèce	Nom latin
Acajou d'Afrique	*Khaya anthotheca*
Aiélé	*Canarium schweinfurthii*
Aniégré	*Pouteria altissima*
Afrormosia	*Pericopsis elata*
Ayous	*Triplochiton scleroxylon*
Azobé	*Lophira alata*
Béli	*Julbernardia pellegriniana*
Bété	*Mansonia altissima*
Bilinga	*Nauclea diderrichii*
Bossé clair	*Guarea cedrata*
Dabéma	*Piptadeniastrum africanum*
Diania	*Celtis tessmannii*
Dibétou	*Lovoa trichilioïdes*
Doussié	*Afzelia bipindensis*
Ebène noir	*Diospyros crassiflora*
Essia	*Petersianthus macrocarpus*
Etimoé	*Copaifera mildbraedii*
Eyong	*Eribroma oblongum*
Fraké	*Terminalia superba*
Iatandza	*Albizia ferruginea*
Ilomba	*Pycnanthus angolensis*
Iroko	*Milicia excelsa*
Kosipo	*Entandrophragma candollei*
Kotibé	*Nesogordonia kabingaensis*
Lati	*Amphimas pterocarpoïdes*

Limbali	*Gilbertiodendron dewevrei*
Longhi abam	*Chrysophyllum lacourtianum*
Longhi beguei	*Chrysophyllum beguei*
Lotofa	*Sterculia rhinopetala*
Moabi	*Baillonella toxisperma*
Movingui	*Distemonanthus benthamianus*
Mukulungu	*Autranella congolensis*
Niangon	*Tarrietia densiflora*
Niové	*Staudtia kamerunensis*
Okan	*Cylicodiscus gabunensis*
Okoumé	*Aucoumea klaineana*
Ossabel	*Dacryodes normandii*
Otungui	*Polyalthia suaveolens*
Ovengkol	*Guibourtia ehie*
Owom	*Manilkara mabokeensis*
Ozigo	*Dacryodes buettneri*
Padouk	*Pterocarpus soyauxii*
Pao rosa	*Bobgunnia fistuloïdes*
Sapelli	*Entandrophragma cylindricum*
Sipo	*Entandrophragma utile*
Sorro	*Scyphocephalium mannii*
Tali	*Erythrophleum suaveolens et Erythrophleum ivorense*
Tchitola	*Prioria oxyphylla*
Tiama	*Entandrophragma angolense*
Tola	*Prioria balsamifera*
Wamba	*Tessmannia africana*

BIBLIOGRAPHIE

Banque Africaine de Développement (2019). Rapport Stratégique Régional - Développement intégré et durable de la filière bois dans le Bassin du Congo : opportunités, défis et recommandations opérationnelles. 308 p. *https://www.afdb.org/en/documents/document/rapport-strategique-regional-developpement-integre-et-durable-de-la-filiere-bois-dans-le-bassin-du-congo-109428*

Bauwens, S., Fayolle, A., Gourlet-Fleury, S., Ndjele, L.M., Mengal, C., Lejeune, P. (2017). Terrestrial photogrammetry: a non-destructive method for modelling irregularly shaped tropical tree trunks. *Methods in Ecology and Evolution 8: 460–471*.

Bauwens, S., Ploton, P., Fayolle, A., Ligot, G., Loumeto, J., Lejeune, P., Gourlet-Fleury, S. (accepted). A 3D approach to model the taper of irregular tree stems: making plots biomass estimates comparable in tropical forests. Ecological Applications.

Betbeder, J., Gond, V., Frappart, F., Baghdadi, N., Briant, G., Bartholomé, E. (2014). Mapping of central africa forested wetlands using remote sensing. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE, 2013, 7 (2): 531-542. (*doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2269733*).

Bouka, D., Ulrich, G., Doumenge, C., Loumeto, J. J., Florence, J., Gonmadje, C., & McKey, D. B. (2019). Des confusions entre espèces préjudiciables à la gestion durable des essences forestières: l'exemple des acajous d'Afrique (Khaya, Meliaceae).

Carlson, B.S., Koerner, S.E., Medjibe, V.P., White, L.J.T., Poulsen, J.R. (2017). Deadwood stocks increase with selective logging and large tree frequency in Gabon. Global Change Biology, 23: 1648-1660 (*doi.org/10.1111/gcb.13453*).

Chave, J., Maxime Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrízar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., Vieilledent, G. (2014). *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global Change Biology* 20, 3177–3190.

Cheliout, A. (2019). Modélisation de l'accroissement diamétrique des arbres d'une forêt du Nord Congo à l'aide de données de télédétection acquises par drone en apport aux mesures de terrain. Mémoire de master de l'Université de Montpellier et d'AgroParisTech.

Claeys, F., Gourlet-Fleury, S., Picard, N., Ouédraogo, D.Y., Tadesse, M.G., Hérault, B., Baya, F., Bénédet, F., Cornu, G., Mortier, F. (2019). Climate change would lead to a sharp acceleration of Central African forests dynamics by the end of the century. *Environmental Research Letters*, 14 (4):044002, 22 p. (*doi.org/10.1088/1748-9326/aafb81*).

Daïnou, K., Blanc-Jolivet, C., Degen, B., Kimani, P., Ndiade-Bourobou, D., Donkpegan, A. S., ... & Hardy, O. J. (2016). Revealing hidden species diversity in closely related species using nuclear SNPs, SSRs and DNA sequences–a case study in the tree genus Milicia. *BMC evolutionary biology*, 16(1), 259.

Donkpegan, S. (2017). *Histoire évolutive du complexe Afzelia Smith (Leguminosae-Caesalpinioideae) dans les écosystèmes forestiers et savanicoles en Afrique tropicale* (Doctoral dissertation, Université de Liège,Liège, Belgique).

Douh, C., Daïnou, K., Loumeto, J. J., Moutsambote, J. M., Fayolle, A., Tosso, F., ... & Doucet, J. L. (2018). Soil seed bank characteristics in two central African forest types and implications for forest restoration. *Forest Ecology and Management*, 409, 766-776.

Droissart, V., Dauby, G., Hardy, O.J., Deblauwe, V., Harris, D.J., Janssens, S., Mackinder, B.A., Blach-Overgaard, A., Sonké, B., Sosef, M.S.M., Stévart, T., Svenning, J.-C., Wieringa, J.J., Couvreur, T.L.P. (2018). Beyond trees: Biogeographical regionalization of tropical Africa. Journal of Biogeography, 45: 1153-1167 (*doi.org/10.1111/jbi.13190*).

Evrard, Q., Hardy, O. J., Tagg, N., & Doucet, J. L. (2019). Removal and predation of aril-covered seeds: the case of Afzelia bipindensis (Fabaceae–Detarioidae). *Plant ecology and evolution*, 152(3), 460-469.

Ewédjè, E. E. B. K., Jansen, S., Koffi, G. K., Staquet, A., Piñeiro, R., Essaba, R. A., ... & Hardy, O. J. (2020). Species delimitation in the African tree genus Lophira (Ochnaceae) reveals cryptic genetic variation. *Conservation Genetics*, 1-14.

Fayolle, A., Picard, N., Doucet, J.-L., Swaine, M., Bayol, N., Bénédet, F., Gourlet-Fleury, S. (2014). A new insight in the structure, composition and functioning of central African moist forests. *Forest Ecology and Management*, 329: 195–205.

Fayolle, A., Swaine, M. D., Bastin, J.-F., Bourland, N., Comiskey, J. A., Dauby, G., Doucet, J.-L., Gillet, J.-F., Gourlet-Fleury, S., Hardy, O. J., Kirunda, B., Kouamé, F. N., Plumptre, A. J. (2014). Patterns of tree species composition across tropical African forests. *Journal of Biogeography*, 41(12): 2320-2331 (*doi.org/10.1111/jbi.12382*).

Fayolle, A., Ngomanda, A., Mbasi, M., Barbier, N., Bocko, Y., Boyemba, F., Couteron, P., Fonton, N., Kamdem, N., Katembo, J. et al. (2018). *A regional allometry for the Congo basin forests based on the largest ever destructive sampling. Forest Ecology and Management*, 430: 228-240 (*doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.030*).

Fétéké, F., Fayolle, A., Dainou, K., Bourland, N., Dié, A., Lejeune, P., ... & 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(4) : 3-21.

Fofana M.L. (2018). Estimation du stock de carbone dans les compartiments de petites tiges : application au dispositif DynAfFor de Loundoungou (en République du Congo). Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie, INPFHB, Yamoussoukro.

FRA (2015). Evaluation des ressources forestières mondiales 2015. Répertoire de données de FRA 2015. 253 p.

FRMi (2018). Vision stratégique et industrialisation de la filière bois dans les 6 pays du Bassin du Congo. Horizon 2030. Accroître / Sécuriser / Valoriser les ressources en bois. Rapport stratégique régional. Août 2018. 232 p.

Forni, E., Rossi, V., Gillet, J.-F., Bénédet, F., Cornu, G., Freycon, V., Zombo, I., Mazengué, M., Alberny, E., Mayinga, M., Istace, V., Gourlet-Fleury, S. (2019). Dispositifs permanents de nouvelle génération pour le suivi de la dynamique forestière en Afrique centrale : bilan en République du Congo. Bois et Forêts des Tropiques, 341 : 55-70.

Gorel, A. P., Steppe, K., Beeckman, H., De Baerdemaeker, N. J., Doucet, J. L., Ligot, G., ... & Fayolle, A. (2019). Testing the divergent adaptation of two congeneric tree species on a rainfall gradient using eco-physio-morphological traits. *Biotropica*, 51(3), 364-377.

Hubau W., Lewis S.L., Phillips O.L., Affum-Baffoe K., Beeckman H., Cuni Sanchez A., Daniels A.K., Ewango C., Fauset S., Mukinzi J.M., et al. (2020). Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature*, 579 : 80-87. (*doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0*).

Kouassi K.A. (2018). Estimation du stock de carbone dans les compartiments de bois morts : application au dispositif DynAfFor de Loundoungou (en République du Congo). Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie, INPFHB, Yamoussoukro.

Lenz, S. (2018). Impact des termitières sur les propriétés des sols forestiers tropicaux humides : application au dispositif DynAfFor de Loundoungou (République du Congo). Mémoire de master de l'Université Paris-Saclay.

Levis, C., Costa, F.R.C., Bongers, F., Peña-Claros, M., Clement, C.R., Junqueira, A.B., Neves, E.G., Tamanaha, E.K., Figueiredo, F.O.G., Salomão, R.P. (2017). Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. Science 355, 6328: 925-931 (*doi.org/10.1126/science.aal0157*).

Lewis, S., Sonké, B., Sunderland, T., Begne, S.K., Lopez-Gonzalez, G., …, Zemagho, L. (2013). Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, 368, 20120295 (*doi.org/10.1098/rstb.2012.0295*).

Linder, H.P., de Klerk, H.M., Born, J., Burgess, N.D., Fjeldsa, J., Rahbek, C. (2012). The partitioning of Africa: statistically defined biogeographical regions in sub-Saharan Africa. *Journal of Biogeography*, 39(7): 1189-1205 (*doi: 10.1111/j.1365-2699.2012.02728.x*).

Le Garrec M. (2020). Dispersion des graines et du pollen chez une espèce d'arbre d'Afrique centrale : *Triplochiton scleroxylon* K. SCHUM. Travail de fin d'études. ULB, Bruxelle

Ligot G., Fayolle A., Gourlet-Fleury S., Daïnou K., Gillet J.-F., De Ridder M., Drouet T., Groenendijk P., Doucet J.-L. (2019). Growth determinants of timber species *Triplochiton scleroxylon* and implications for forest management in central Africa. *Forest Ecology and Management*, 437: 211-221. (*doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.042*

Loubota Panzou G.J., Fayolle A., Feldpausch T.R., Ligot G., Doucet J.L., Forni E., Zombo I., Mazengue M., Loumeto J.J., Gourlet-Fleury S. (2018). What controls local-scale aboveground biomass variation in central Africa? Testing structural, composition and architectural attributes. *Forest Ecology and Management* 429: 570-578. *https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.056*.

Monthe, F. K., Hardy, O. J., Doucet, J. L., Loo, J., & Duminil, J. (2017). Extensive seed and pollen dispersal and assortative mating in the rain forest tree *Entandrophragma cylindricum* (Meliaceae) inferred from indirect and direct analyses. *Molecular ecology*, 26(19), 5279-5291.

Monthe Kameni F. S. (2019). Origine et dynamique de la diversité génétique des arbres Guinéo-Congolais du genre Entandrophragma et implications pour une gestion durable. Thèse de doctorat. ULB, Bruxelles.

Morin-Rivat, J., Fayolle, A., Gillet, J.-F., Bourland, N., Gourlet-Fleury, S., Oslisly, R., Bremond, L., Bentaleb, I., Beeckman, H., Doucet, J.-L. (2014). New evidence of human activities during the Holocene in the lowland forests of the Northern Congo Basin. *Radiocarbon* 56(1): 209-220.

Morin-Rivat J., Fayolle A., Favier C., Bremond L., Gourlet-Fleury S., Bayol N., Lejeune P., Beeckman H., Doucet J.L. (2017). Present-day central African forest is a legacy of the 19th century human history. *eLife* 6 : 18 p. (*http://dx.doi.org/10.7554/eLife.20343*).

Ndamiyehe Ncutirakiza, J.B., Lejeune, P., Gourlet-Fleury, S., Fayolle, A., Ndjele Mianda-Bungi, L., Ligot, G. (2020). Quantifier les dimensions des houppiers à l'aide d'images aériennes à haute résolution pour estimer l'accroissement diamétrique des arbres dans les forêts d'Afrique centrale. Bois et Forêts des Tropiques 343 : 67-81 (DOI: *https://doi.org/10.19182/bft2020.343.a31848*).

Ouédraogo, D.-Y., Doucet, J.-L., Daïnou, K., Baya, F., Biwolé, A. B., Bourland, N., Fétéké, F., Gillet, J.-F., Kouadio, Y.L., Fayolle, A. (2018). The size at reproduction of canopy tree species in central Africa. *Biotropica*, 50(3), 465–476. (*https://doi.org/10.1111/btp.12531*).

Picard N., Gourlet-Fleury S., 2008. Manuel de référence pour l'installation de dispositifs permanents en forêt de production dans le Bassin du Congo, COMIFAC/CIRAD, 265 p.

Philippon, N., Cornu, G., Monteil, L., Gond, G., Moron, V., Pergaud, J., Sèze, G., Bigot, S., Camberlin, P., Doumenge, C., Fayolle, A., Ngomanda, A. (2019). The light-deficient climates of western Central African evergreen forests. Environmental Research Letters, 14(3), 034007 (*https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5d8*).

Phillips, O.L., Aragao, L.E.O.C., Lewis, S.L., Fisher, J.B. et al. (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. Science 323: 1344-1347 (*https://doi.org/10.1126/science.1164033*).

Réjou-Méchain, M., Mortier, F., Bastin, J.-F., Cornu, G., Barbier, N., Bayol, N., Bénédet, F., Bry, X., Dauby, G., Deblauwe, V., Doucet, J.-L., Doumenge, C., Fayolle, A., Garcia, C., Kibambe, J.-P ., Loumeto, J.-J., Ngomanda, A., Ploton, P., Sonké, B., Trottier, C., Vimal, R., Yongo, O., Pélissier, R., Gourlet-Fleury, S. (*2021*). Unveiling African rainforest composition reveals global warming threat. *Nature 593: 90–94, https://doi.org/10.1038/s41586-021-03483-6*.

République Centrafricaine (2009). Normes nationales d'élaboration des plans d'aménagement. Phase d'élaboration et d'approbation du scénario d'aménagement. Ministère des Eaux, Forêts, Chasse et Pêche, chargé de l'environnement. 75 p.

République démocratique du Congo (2017). Prévision et planification des récoltes sur la série de production ligneuse. Guide opérationnel, série : plan d'aménagement forestier –n°2. Ministère de l'environnement et développement durable, 38 p.

République du Cameroun (1998). Guide d'élaboration des plans d'aménagement des forêts de production du domaine forestier permanent de la République du Cameroun. Ministère de l'Environnement et des Forêts, Direction des forêts. Yaoundé, 23 p. + annexes

République du Congo (2005). Normes nationales d'inventaire d'aménagement des ressources forestières en République du Congo. CNIAF/MEFE, Brazzaville, 71 p.

République gabonaise (2004). Décret n°689/PR/MEFEPEPN définissant les normes techniques d'aménagement et de gestion durable des forêts domaniales productives enregistrées.

Sosef, M. S. et al. (2017). Exploring the floristic diversity of tropical Africa. *BMC biology*, 15, 15.

Tosso, F., Hardy, O. J., Doucet, J. L., Daïnou, K., Kaymak, E., & Migliore, J. (2018). Evolution in the Amphi-Atlantic tropical genus Guibourtia (Fabaceae, Detarioideae), combining NGS phylogeny and morphology. *Molecular phylogenetics and evolution*, 120, 83-93.

Tosso, F., Daïnou, K., Sonké, B., Levicek, C., Bracke, C., Forni, É., Jobbé-Duval, B., Ligot, G., Tchuanté Tite, V., Gourlet-Fleury, S., Doucet, J.-L. (2020). Sentiers de suivi de la croissance, de la mortalité et de la phénologie des arbres tropicaux : guide méthodologique. Agronomie Gembloux, Presses Universitaires de Liège, 124 p.

Viennois, G., Bétard, F., Freycon, V., Barbier, N., Couteron, P. (accepted). Automated landform classification and mapping using a combined textural-morphometric approach: the Congo basin and surroundings. *Journal of Geomorphology*.

LES PARTENAIRES DES PROJETS DYNAFFOR ET P3FAC : des institutions, des entreprises et des centres de recherche unis pour faire progresser les connaissances

Le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM) soutient des projets innovants en faveur de l'environnement dans les pays en développement. Créé en 1994 par le gouvernement français à la suite du premier Sommet de la Terre, il a déjà permis de soutenir plus de 350 projets dans plus de 120 pays, dont les deux tiers en Afrique. Le FFEM travaille en partenariat avec des acteurs publics, privés ou de la société civile, du Sud comme du Nord, et avec d'autres bailleurs et organisations internationales. Les projets qu'il finance génèrent localement des bénéfices environnementaux, sociaux et économiques. Ils contribuent à préserver la biodiversité, le climat, les eaux internationales, les terres et la couche d'ozone et luttent contre les pollutions chimiques.
La particularité du FFEM : miser sur des projets pilotes pour en tirer les enseignements et diffuser leurs innovations à plus grande échelle. Les projets financés sont également soutenus par les ministères membres de son comité de pilotage ou par Agence française de développement (AFD).

La COMIFAC, Commission des Forêts d'Afrique centrale est une organisation internationale reconnue pour son rôle dans l'intégration sous-régionale en matière de conservation et de gestion durable et concertée des écosystèmes forestiers. Elle fait partie des institutions à l'échelle planétaire qui œuvrent pour la promotion du droit des peuples à compter sur les ressources forestières pour soutenir leurs efforts de développement économique et social. Conformément aux dispositions de son Traité Constitutif, notamment en son article 5, la COMIFAC est chargée de l'orientation, de l'harmonisation et du suivi des politiques forestières et environnementales en Afrique centrale. Ainsi, la COMIFAC doit favoriser la mise en place des réseaux liant les institutions pertinentes de recherche et de développement forestier, et renforcer la coordination ainsi que la coopération entre toutes les organisations nationales et internationales impliquées dans les actions de conservation et de gestion durable des écosystèmes forestiers.
Depuis le début du projet DynAfFor avec l'atelier de lancement d'octobre 2014, la COMIFAC a assuré la présidence des différents comités de pilotage du projet, et a soutenu celui-ci tout au long de son parcours.

L'ATIBT contribue au développement durable et responsable de la filière forêts-bois tropicaux, de la forêt jusqu'aux marchés. L'Association entend faciliter une coopération efficace et novatrice entre toutes les parties prenantes concernées pour développer et mettre en œuvre la gestion durable et responsable des forêts tropicales, afin d'augmenter leur contribution au développement sur le long terme des économies des pays forestiers.
A ce titre, elle fournit aux acteurs de celle-ci toutes informations, formations, appui technique et scientifique, encourageant les meilleures pratiques dans tous les métiers de la filière, notamment en vue d'assurer la viabilité économique, l'équité sociale et la conservation des écosystèmes forestiers.
L'ATIBT représente en particulier les exploitants et industriels forestiers, essentiellement implantés en Afrique, fournisseurs de produits en bois tropicaux, et tous les autres acteurs de la filière engagés dans la gestion forestière responsable. A ce titre, elle promeut sur les marchés mondiaux les bois tropicaux récoltés selon des pratiques responsables.

Le Groupe ALPI S.P.A, fondateur du Groupe ALPICAM, est une société à capitaux privés et familiaux créée en Italie en 1918 par PIETRO ALPI. Il s'est spécialisé dans la production de placage en bois selon une technique exclusive de fabrication d'un matériel nouveau : le bois recomposé. ALPI s'est déployé dans le monde et s'est installé au Cameroun en 1975, sous la forme d'une Société à Responsabilité Limitée (SARL) de droit camerounais. Ses 3 grandes sociétés locales sont : Alpi Pietro et fils Cameroun SARL, la société des grumes du Cameroun (Grumcam) et Alpicam Industries SARL. Cette dernière est spécialisée aujourd'hui dans la production de produits finis de 3ème transformation pour l'export international. Ses activités : exploitation forestière, transformation et exportation grumes et sciage. Ses produits : placage, contreplaqué, tranché et débité. Ses marchés : Italie, France, Espagne, Brésil, Chine, Inde, Thaïlande, Pakistan, Tunisie, Sénégal, Turquie, Égypte, USA, Argentine, Russie, Angleterre, Belgique.

La CIB, filiale du groupe OLAM, est une société spécialisée dans l'exploitation forestière, la transformation industrielle et la commercialisation du bois. Elle est basée au Nord Congo depuis 1969, plus précisément dans la Commune de Pokola, département de la Sangha. Elle compte plus 1 000 travailleurs permanents à ce jour. Elle est attributaire de 4 unités forestières d'aménagement (UFA), couvrant environ 2,2 millions d'hectares : Pokola, Kabo, Loundoungou-Toukoulaka et Mimbeli Ibenga, certifiées FSC. Elle possède également 4 unités industrielles de production (scieries), 41 séchoirs, une unité de moulurage, un atelier de menuiserie et un atelier de fabrication de maisons ossature bois.

La société africaine IFO (Industrie Forestière de Ouesso) est certifiée par le Forest Stewardship Council (FSC). L'IFO est l'un des pionniers de la certification FSC dans le Bassin du Congo, depuis 2009 déjà, date à laquelle IFO a pu passer avec succès le premier audit exercé par la SGS (Société Générale de Surveillance). Ces certificats garantissent la gestion des 1,16 millions d'hectares de concession forestière de IFO selon les normes sociales, économiques et environnementales du FSC. IFO gère ainsi la plus grande zone de forêt contiguë certifiée dans les régions tropicales.

La société PALLISCO est installée au Cameroun dans les régions du Littoral (siège social Bonanjo - Douala) et de l'Est (Mindourou – Département du Haut-Nyong). Les principales activités de Pallisco sont l'exploitation forestière et la vente de grumes. Elle gère 7 concessions (UFA = Unité Forestière d'Aménagement) d'une superficie de 388 949 ha. Les principales activités de sa filiale CIFM est la transformation (première et seconde) et la vente des produits bois sur les marchés locaux et internationaux. Elle transforme exclusivement les grumes issues des concessions gérées par PALLISCO et commercialise plus de 25 essences dans un peu plus de 30 pays. PALLISCO et CIFM sont certifiées OLB (Origine et Légalité des Bois) et FSC (Forest Stewardship Council) par Bureau Veritas Cameroun depuis respectivement 2005 et 2008.

Le cœur de métier de l'entreprise CEB - Precious Woods est la production et la commercialisation de bois tropicaux semi-finis certifiés FSC et PEFC/PAFC sur une superficie totale de 1,2 millions d'hectares de forêt tropicale. L'utilisation de la biomasse provenant des procédés de la transformation du bois pour produire de l'énergie verte permet également à Precious Woods au Brésil de vendre des Certificats de Réduction des Émissions (CER). Au centre de toutes les activités commerciales, il y a la préoccupation de satisfaire les besoins de nos clients, ce qui représente la force motrice qui est derrière le succès économique de Precious Woods. Cela est la base des activités socialement et écologiquement durables et donc de la protection des forêts tropicales à long terme. Le groupe Precious Woods, dont le siège social est situé en Suisse, emploie environ 1 300 personnes au Brésil, au Gabon et en Suisse (2017).

Avec plus de 1,5 millions d'hectares de concessions forestières au Congo et au Gabon Rougier Afrique International regroupe l'ensemble des activités industrielles et commerciales du groupe liées à la gestion durable des forêts naturelles du Bassin du Congo. En tant qu'acteur intégré, Rougier et ses filiales Rougier Gabon et Mokabi maîtrisent la totalité de la chaîne de production du bois depuis les concessions forestières jusqu'aux clients, importateurs et industriels. Transportés par camion, train ou bateau, les produits sont commercialisés dans le monde entier.

Active depuis 2000, l'association belge Nature+ est spécialisée dans les approches communautaires et participatives de la gestion des ressources naturelles. Principalement orientée vers l'Afrique centrale, elle intervient essentiellement dans le domaine de la foresterie communautaire, de l'assistance technique aux exploitants forestiers (y compris l'intégration des volets faune et social dans l'aménagement) et de la gestion des produits forestiers non ligneux (végétaux et animaux). Nature+ est également reconnue en tant que prestataire en formation. Composée d'experts forestiers, Nature+ assiste les gestionnaires des milieux naturels tropicaux en proposant des interventions ciblées reposant sur des bases scientifiques solides. A cette fin, elle travaille en étroite collaboration avec le groupe d'étude des Forêts d'Afrique centrale de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège, Belgique).

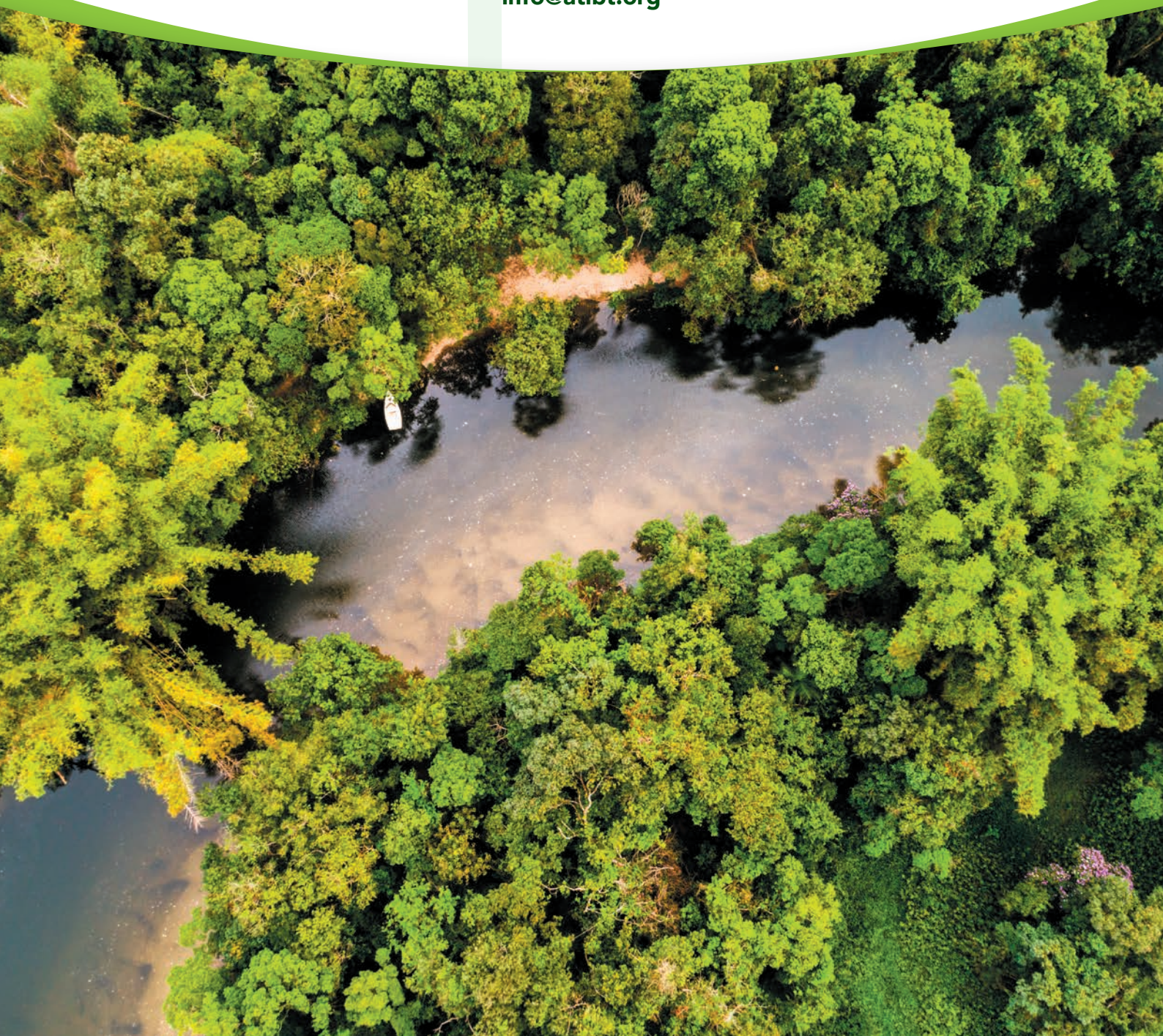
Le CIRAD, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, est l'organisme français de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes. Avec ses partenaires, il co-construit des connaissances et des solutions pour inventer des agricultures résilientes dans un monde plus durable et solidaire. Il mobilise la science, l'innovation et la formation afin d'atteindre les objectifs de développement durable. Il met son expertise au service des politiques publiques pour favoriser la protection de la biodiversité, les transitions agroécologiques, les systèmes alimentaires durables, la santé (des plantes, des animaux et des écosystèmes), le développement durable des territoires ruraux et leur résilience au changement climatique. L'unité de recherche « Forêts et sociétés », plus particulièrement impliquée dans le collectif DYNAFAC est une équipe pluri-disciplinaire dont le principal objectif est de conserver, valoriser et restaurer les forêts tropicales par la mise en place et la promotion de pratiques de gestion durable de leurs ressources, au profit des populations rurales et de la société en général

---

Faculté à la pointe du développement durable, Gembloux Agro-Bio Tech forme des bioingénieurs grâce à un programme complet en cinq ans. Plusieurs filières d'étude distinctes permettent aux étudiants de se spécialiser dans des domaines clés des sciences du vivant, dont la gestion des forêts et des espaces naturels. Gembloux Agro-Bio Tech abrite une équipe de recherche spécialisée en foresterie tropicale. En Afrique centrale, elle a noué de nombreuses conventions de collaboration avec les institutions de recherche et de formation ainsi qu'avec le secteur privé. Intégrée à l'Université de Liège depuis 2009, Gembloux Agro-Bio Tech est une faculté à taille humaine, ouverte sur le monde et dont la qualité de l'enseignement et l'excellence des recherches sont réputées internationalement.

Basée au sein du service Evolution Biologique et Ecologie (EBE) de l'Université Libre de Bruxelles (ULB), l'équipe dirigée par le Dr. Olivier HARDY mène des recherches sur la diversité génétique des plantes tropicales africaines en relation avec les processus historiques et actuels ayant façonné cette diversité. Il s'agit aussi bien de comprendre comment les changements climatiques des derniers millions d'années ont contribué à l'apparition d'espèces ou la différenciation entre peuplements d'arbres (projet AFRIFORD financé par Belspo), que de décrire comment les mécanismes de dispersion des graines et du pollen affectent les capacités de reproduction des essences forestières (projet AFRITIMB financé par F.R.S.-FNRS), ou encore prédire quelles espèces ou peuplements seront les mieux adaptés au climat future (financement IF@ ULB). Ces recherches fondamentales informent des travaux plus appliqués visant la gestion durable des ressources forestières et la conservation de leur biodiversité. Ce transfert de connaissances se réalise via de nombreuses collaborations, particulièrement avec le groupe d'étude des Forêts d'Afrique centrale de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège, Belgique).

DYNAFAC

AMÉLIORER LA GESTION FORESTIÈRE
EN AFRIQUE CENTRALE

CONTACT :
ATIBT (Association Technique Internationale des Bois Tropicaux).
Campus du Jardin d'Agronomie Tropicale de Paris
45 bis, avenue de la Belle Gabrielle
94736 Nogent-sur-Marne CEDEX - FRANCE
+33 1 43 94 72 64
info@atibt.org