

# Dispositifs permanents de nouvelle génération pour le suivi de la dynamique forestière en Afrique centrale : bilan en République du Congo

Éric FORNI<sup>1,2</sup>  
Vivien ROSSI<sup>2,3,4</sup>  
Jean-François GILLET<sup>5</sup>  
Fabrice BÉNÉDET<sup>2,6</sup>  
Guillaume CORNU<sup>2,6</sup>  
Vincent FREYCON<sup>2,6</sup>  
Isaac ZOMBO<sup>7</sup>  
Mathurin MAZENGUE<sup>8</sup>  
Élodie ALBERNY<sup>9</sup>  
Mercier MAYINGA<sup>7</sup>  
Vincent ISTACE<sup>7</sup>  
Sylvie GOURLET-FLEURY<sup>2,6</sup>

<sup>1</sup> Cirad  
UPR Forêts et Sociétés  
BP 1352, Brazzaville  
République du Congo

<sup>2</sup> Forêts et Sociétés  
Univ Montpellier, Cirad  
Montpellier  
France

<sup>3</sup> Cirad  
UPR Forêts et Sociétés  
BP 2572, Yaoundé  
Cameroun

<sup>4</sup> UMMISCO, Université Yaoundé I  
BP 337, Yaoundé  
Cameroun

<sup>5</sup> Nature Forest Environment  
Rue du Moulin, 7C  
6929 Porcheresse/Daverdisse  
Belgique

<sup>6</sup> Cirad  
Forêts et Sociétés  
34398 Montpellier  
France

<sup>7</sup> CIB-Olam  
BP 41, Ouessou  
République du Congo

<sup>8</sup> Mokabi SA  
BP 97, Impfondo  
République du Congo

<sup>9</sup> Brooks Bros (UK) Ltd.  
Blackwater Place  
The Causeway  
Maldon, Essex, CM9 4GG  
United Kingdom

**Auteur correspondant /  
Corresponding author:**  
Éric Forni – [eric.forni@cirad.fr](mailto:eric.forni@cirad.fr)



**Photo 1.**  
Fossé matérialisant le coin d'une parcelle.  
Photo E. Forni.

Doi : 10.19182/bft2019.341.a31760 – Droit d'auteur © 2019, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 21 septembre 2018 ;  
date d'acceptation : 26 février 2019 ; date de publication : 1<sup>er</sup> juillet 2019.



Licence Creative Commons :  
Attribution - Pas de Modification 4.0 International.  
Attribution-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-ND 4.0)

## Citer l'article / To cite the article

Forni E., Rossi V., Gillet J.-F., Bénédet F., Cornu G., Freycon V., Zombo I., Mazengue 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. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.341.a31760>

## RÉSUMÉ

### Dispositifs permanents de nouvelle génération pour le suivi de la dynamique forestière en Afrique centrale : bilan en République du Congo

Gérer durablement les forêts tropicales de production nécessite de connaître leur diversité, leur dynamique et l'impact de l'exploitation sur ces caractéristiques. Cette connaissance peut s'obtenir avec de grands dispositifs de suivi permanents dont les arbres sont régulièrement mesurés. Un seul dispositif de ce type existe en Afrique centrale, M'Baïki, installé en 1982 en République centrafricaine. Il a fait référence pour établir les règles d'aménagement d'un grand nombre de concessions forestières de la région. Plusieurs projets ont permis l'installation de nouveaux dispositifs, en privilégiant des zones situées sur des substrats géologiques différents. Deux dispositifs ont ainsi été installés dans des concessions forestières aménagées au nord de la République du Congo, sur alluvions de l'ère cénozoïque (Loundoungou) et sur grès de Carnot de l'ère mésozoïque (Mokabi). Chaque dispositif est constitué de deux blocs de 400 ha, contenant chacun un sentier d'environ 4 000 arbres d'une vingtaine d'espèces commerciales et deux parcelles de 9 ha suivies en plein. Tous les arbres supérieurs à 10 cm de diamètre sont mesurés. Un bloc sera exploité après quelques années de suivi, l'autre restera en témoin. L'installation et le premier inventaire d'un dispositif ont nécessité en moyenne 34 mois de travail avec une équipe de huit personnes pour un coût total moyen de 94 500 €. Les peuplements des deux dispositifs, Loundoungou et Mokabi respectivement, ont les caractéristiques suivantes : 240 et 230 espèces d'arbres, densité de 346,8 ( $\pm 5,8$ ) et 426,8 ( $\pm 3,6$ ) arbres par hectare, biomasse de 432,6 ( $\pm 13,8$ ) et 457,3 ( $\pm 9,3$ ) Mg/ha. Les difficultés rencontrées lors de l'installation des dispositifs (emplacement, localisation des parcelles, constitution des sentiers, application du protocole d'inventaire, logistique...) sont analysées. Plusieurs recommandations sont émises pour améliorer l'installation de tels dispositifs et leur protocole d'inventaire.

**Mots-clés :** dispositifs permanents, DynAffFor, dynamique forestière, gestion forestière, aménagement forestier, forêts de production, forêts tropicales, Afrique centrale.

## ABSTRACT

### New-generation permanent sampling sites to monitor forest dynamics in central Africa: results from the Republic of Congo

Managing tropical production forests sustainably requires knowledge of their diversity and dynamics, and of logging impacts on their characteristics. The necessary knowledge can be obtained by establishing large permanent sampling plots within which trees can be regularly measured. Such a monitoring experimental site exists in central Africa. It was settled in 1982 at M'Baïki, Central African Republic, and has provided reference standards to develop forest management and planning rules for many logging concessions in the region. Several projects have since established new monitoring experimental sites, focusing mainly on areas with different geological substrates. Two of these sites are located in managed logging concessions in the north of the Republic of Congo, on Cenozoic alluvia (Loundoungou) and on Mesozoic Carnot sandstone (Mokabi). Each site comprises two 400 ha blocks, each containing a trail of about 4,000 trees belonging to twenty commercial species and two 9 ha plots in which all trees more than 10 cm in diameter are measured. One block is logged after a few years of monitoring, with the second remaining as a control. Establishing a monitoring experimental site and making the first inventory required, on average, 34 months of work with a team of 8 people, at an average total cost of 94,500 €. The characteristics of the stands in the Loundoungou and Mokabi plots were, respectively: 240 and 230 tree species; densities of 346.8 ( $\pm 5.8$ ) and 426.8 ( $\pm 3.6$ ) trees/ha; biomass 432.6 ( $\pm 13.8$ ) and 457.3 ( $\pm 9.3$ ) Mg/ha. This paper analyses the difficulties encountered in establishing the sites (position, location of the plots, setting up the trails, applying the inventory protocol, logistics, etc.) and puts forward several recommendations to improve both the establishment of such monitoring experimental sites and the inventory protocol.

**Keywords:** permanent monitoring experimental sites, DynAffFor, forest dynamics, forest management, forestry planning, production forests, tropical forests, central Africa.

## RESUMEN

### Dispositivos permanentes de nueva generación para el seguimiento de la dinámica forestal en África Central: balance en la República del Congo

Gestionar de forma sostenible los bosques tropicales de producción requiere conocer su diversidad, su dinámica y el impacto de la explotación sobre estas características. Este conocimiento puede obtenerse con grandes dispositivos de seguimiento permanente en los que los árboles se miden con regularidad. Hay un solo dispositivo de este tipo en África Central: M'Baïki, instalado el 1982 en la República Centroafricana. Ha sido la referencia para establecer las reglas de ordenamiento de un gran número de concesiones forestales de la región. Varios proyectos han permitido instalar nuevos dispositivos, y se ha dado prioridad a zonas situadas en substratos geológicos diferentes. Así, se han instalado dos dispositivos en concesiones forestales habilitadas en el norte de la República del Congo, en aluviones de la era cenozoica (Loundoungou) y en gres de Carnot de la era mesozoica (Mokabi). Cada dispositivo está constituido por dos bloques de 400 ha, cada uno de los cuales incluye un sendero de unos 4 000 árboles con una veintena de especies comerciales y dos parcelas de 9 ha controladas plenamente. Se miden todos los árboles de más de 10 cm de diámetro. Un bloque se explota después de algunos años de seguimiento, el otro permanece como testigo. La instalación y el primer inventario de un dispositivo requirieron una media de 34 meses de trabajo con un equipo de ocho personas por un coste total medio de 94 500 €. La masa de los dos dispositivos, Loundoungou y Mokabi respectivamente, tiene las características siguientes: 240 y 230 especies de árboles, densidad de 346,8 ( $\pm 5,8$ ) y 426,8 ( $\pm 3,6$ ) árboles/ha, biomasa de 432,6 ( $\pm 13,8$ ) y 457,3 ( $\pm 9,3$ ) Mg/ha. Se analizan las dificultades encontradas durante la instalación de los dispositivos (ubicación, localización de las parcelas, constitución de los senderos, aplicación del protocolo de inventario, logística...), y se formulan varias recomendaciones para mejorar la instalación de tales dispositivos y su protocolo de inventario.

**Palabras clave:** dispositivos permanentes, DynAffFor, dinámica forestal, gestión forestal, ordenamiento forestal, bosques de producción, bosques tropicales, África Central.

## Introduction

La gestion durable des forêts tropicales est un enjeu plus que jamais d'actualité, dans un monde où croissance démographique et développement économique se traduisent par des besoins croissants en produits forestiers et en espace foncier. Là où la forêt a été reconnue comme le mode d'usage principal de la terre, en particulier là où ont été délimitées des forêts de production au sein d'un domaine forestier permanent, se pose la question du maintien à long terme des peuplements exploités. Afin de raisonner sur le nombre d'arbres et le volume de bois pouvant être prélevés à chaque récolte dans ces forêts sans les dégrader (Durrieu de Madron et Forni, 1997), la mise en place de parcelles permanentes comparant forêt non exploitée et forêt exploitée est indispensable. La plupart des codes forestiers des pays d'Afrique centrale prévoient l'installation de tels dispositifs de suivi de la dynamique forestière dans la série de recherches des plans d'aménagement, mais cette obligation est peu respectée en pratique. Ainsi, alors que de nombreuses parcelles existent dans le Bassin amazonien et en Asie du Sud-Est, elles restent rares en Afrique centrale (manuel Comifac<sup>1</sup> ; Picard et Gourlet-Fleury, 2008).

Le dispositif le plus complet en Afrique, alliant parcelles permanentes de grande taille (4 ha chacune), test de différents types d'interventions sylvicoles (exploitation et éclaircie) et répétitions de ces interventions, est le dispositif de M'Baïki en République centrafricaine (Schmitt, 1982 ; Tran-Hoang *et al.*, 1991 ; Bedel *et al.*, 1998 ; Gourlet-Fleury *et al.*, 2013a, 2013b). Installées en 1982, les dix parcelles qui le constituent ont fait l'objet de campagnes de mesure quasi annuelles (30 campagnes à ce jour). Ce dispositif a permis d'apporter de nombreuses connaissances sur la croissance et la démographie de différentes espèces, largement utilisées pour établir les plans d'aménagement des concessions d'Afrique centrale (Fargeot *et al.*, 2004 ; Picard et Gourlet-Fleury, 2008 ; Mille et Louppe, 2015).

Cependant, des questions se posent sur la représentativité du dispositif de M'Baïki et la généralisation, dans la région, des résultats issus de son suivi. Installer de nouveaux dispositifs, dans des endroits représentatifs d'autres conditions environnementales, est devenu indispensable pour vérifier si les plans d'aménagement et les règles d'exploitation doivent être adaptés à des dynamiques potentiellement différentes pour rester durables. Les données et les connaissances assemblées à M'Baïki ont servi de base pour imaginer des dispositifs de « deuxième génération » pouvant être installés dans ces nouveaux endroits.

L'installation des trois premiers dispositifs de deuxième génération, complémentaires à M'Baïki, a ainsi été réalisée grâce aux projets « Relance de la recherche agronomique et forestière » (Re2AFor) et « Forêt et changement climatique au Congo » (FCCC), financés par l'Union européenne de 2007 à 2016 pour le site de la réserve de Yoko en République démocratique du Congo (RDC), et surtout grâce au projet DynAffor, financé par le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM) et l'Agence française de développement (AFD) depuis 2013<sup>2</sup> pour les sites de Loundoungou

et Mokabi en République du Congo (RC). Ces dispositifs font partie du réseau « DynAffor » et seront, dans la mesure du possible, réinventoriés annuellement.

Cet article est consacré à l'installation de ces deux derniers dispositifs, les plus complets du réseau, dans deux concessions situées au nord de la RC. Il présente les étapes d'installation des dispositifs, le bilan technique et financier de leur mise en place et quelques grandes caractéristiques des forêts inventoriées. Son objectif est de dresser un bilan sur la mise en place de tels dispositifs et sur les difficultés rencontrées, démarche originale car, à notre connaissance, aucun dispositif de ce type n'a encore été installé en zone tropicale.

## Rappel des grands principes des dispositifs de deuxième génération

Les dispositifs de deuxième génération (Picard et Gourlet-Fleury, 2008) ont été conçus pour pouvoir estimer correctement les impacts de l'exploitation d'espèces de bois d'œuvre sur la reconstitution de leur stock. Leur composition et leur taille reposent sur des analyses statistiques réalisées à partir des données collectées sur le dispositif de M'Baïki. La démarche a été la suivante : quantifier, sur ce dispositif, la dynamique – croissance, mortalité, recrutement – observée sur les espèces, en particulier commerciales et présentes dans une grande partie de l'Afrique centrale ; estimer l'effectif des arbres devant être suivis dans le temps pour pouvoir correctement estimer la reconstitution du stock commercial sur une durée de rotation et en déduire la superficie devant être couverte pour optimiser la possibilité de trouver cet effectif.

Les recommandations, détaillées dans le manuel, sont les suivantes. Premièrement, environ 400 ha de forêt (désignés par le terme « bloc ») doivent être parcourus et préinventoriés pour trouver un effectif moyen de 200 arbres (soit 20 arbres par classe de diamètre à 1,30 m ou DHP, allant de la classe 10-20 cm DHP, à la classe  $\geq 100$  cm DHP), jugé suffisant pour estimer correctement la croissance et la mortalité d'une espèce commerciale. Les arbres à suivre sont alors répartis le long de « sentiers », au sein des 400 ha. Une telle superficie à couvrir traduit la faible abondance de ces espèces, qui rend difficile l'utilisation de parcelles permanentes classiques. Par ailleurs, et comme nous le verrons, il est inévitable qu'au sein de ces 400 ha certaines espèces n'atteignent pas l'effectif de 200 arbres. Deuxièmement, des « parcelles » couvrant environ 20 ha, localisées au sein des 400 ha, doivent être inventoriées régulièrement pour pouvoir estimer le taux de recrutement des espèces commerciales. Par ailleurs, l'inventaire complet (tous les arbres vivants  $\geq 10$  cm DHP) de ces parcelles permet d'avoir accès à des données sur des espèces qui ne sont pas actuellement commerciales mais pourraient le devenir à court ou moyen terme, à la composition floristique et à la diversité de la forêt, et enfin à la biomasse aérienne stockée, ainsi qu'à l'évolution dans le temps de toutes ces caractéristiques. Conçus pour les forestiers, ces dispositifs fournissent donc beaucoup d'autres informations pour les écologues. Aucun équivalent n'existe actuellement dans le domaine tropical.

1 Comifac : Commission des forêts d'Afrique centrale.

2 [www.dynaffor.org](http://www.dynaffor.org)

Enfin, l'estimation correcte et quantifiée des effets de l'exploitation nécessite de pouvoir suivre à la fois un bloc (et ses parcelles) témoin, d'une part, et un bloc (et ses parcelles) exploité, d'autre part ; chaque dispositif de deuxième génération, installé sur un site, doit donc contenir deux blocs d'environ 400 ha et deux groupes de parcelles d'environ 20 ha. Nous détaillerons l'installation de ces dispositifs dans les paragraphes qui suivent.

## Installation des dispositifs

### Critères de localisation et de choix des sites

Trois critères essentiels ont guidé la recherche des sites où installer des dispositifs de deuxième génération. Il s'agissait de choisir des conditions environnementales différentes, en particulier du point de vue des substrats géologiques, de sélectionner des zones dans lesquelles la forêt n'avait jamais été exploitée, pour permettre de distinguer sans ambiguïté les effets de l'environnement de ceux de l'exploitation, et enfin de travailler en collaboration avec des exploitants forestiers prêts à s'impliquer dans un suivi à long terme d'un dispositif et susceptibles d'appliquer les connaissances acquises dans leurs concessions.

Deux sites ont ainsi été localisés dans le nord de la RC, compte tenu de ces critères, du financement disponible, et des premières recherches menées dans le cadre du projet

CoForChange<sup>3</sup> (Fayolle *et al.*, 2014). Il s'agit des sites de Loundougou dans la concession de CIB-Olam (unité forestière d'aménagement ou UFA de Loundougou-Toukoulaka, unité forestière de production ou UFP 2) et de Mokabi dans la concession de Rougier Mokabi SA (UFA de Mokabi-Dzanga, UFP 5) (figure 1). Ils sont situés sur deux substrats géologiques différents (Freycon, 2014) : alluvions du Cénozoïque à Loundougou (altitude moyenne 430 m, pluviométrie annuelle 1 605 mm de 2003 à 2017) et grès de Carnot du Mésozoïque à Mokabi (altitude moyenne 530 m, pluviométrie annuelle 1 420 mm en 2016). Ils sont également différents des sites de M'Baïki, sur grès-quartzites du Précambrien (altitude moyenne 500-600 m, pluviométrie annuelle 1 739 mm de 1981 à 2008) et du site de Yoko, en RDC sur alluvions quaternaires (altitude moyenne 420 m, pluviométrie annuelle 1 846 mm de 1998 à 2017 ; INERA et Pr F. Kombele, com. pers.).

Une fois les nouveaux sites globalement localisés, une phase de prospection a permis de repérer les endroits précis où installer chaque dispositif (un dispositif par site). Les critères majeurs de sélection étaient l'aspect « non perturbé »<sup>4</sup> de la forêt, la nécessité de se trouver dans une assiette de coupe prévoyant le passage en exploitation d'une partie du dispositif quelques années après sa mise en place, la proximité d'un cours d'eau permettant d'installer un campement, et

<sup>3</sup> [coforchange.cirad.fr](http://coforchange.cirad.fr)

<sup>4</sup> Dans le sens « absence confirmée visuellement » de trace d'exploitation antérieure, en particulier d'anciennes pistes.

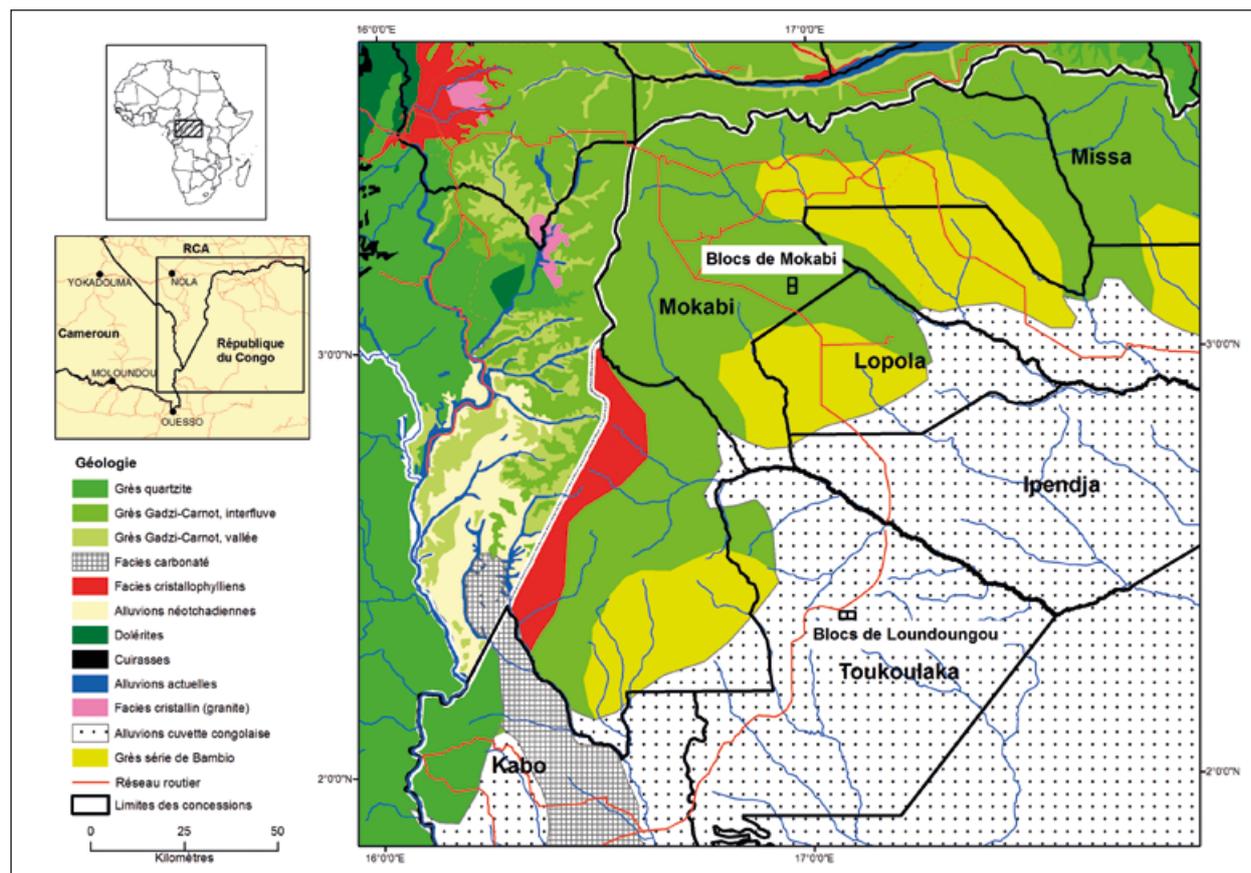


Figure 1.

Localisation des dispositifs de deuxième génération installés dans deux sites du nord de la République du Congo : Mokabi sur le substrat géologique des grès de Carnot, Loundougou sur celui des alluvions de la cuvette congolaise.

enfin une densité d'arbres suffisante appartenant aux espèces commerciales sur lesquelles sont basés les modèles économiques des compagnies forestières partenaires, en particulier le sapelli (*Entandrophragma cylindricum* (Sprague) Sprague).

### Mise en place des dispositifs

Deux blocs, ainsi que leurs parcelles, devaient donc être installés sur chaque site (annexe 1, figure A-1, exemple du dispositif de Loundougou) ; l'un des deux blocs restera intact de manière à constituer un témoin, et l'autre fera l'objet d'une exploitation classique, après avoir été suivi quelques années avant exploitation. Les parcelles et les sentiers devaient être installés dans chaque bloc.

### Installation des blocs de 400 ha et préinventaire

Chaque bloc a été délimité sur le terrain par un layon périphérique puis quadrillé selon une maille de 100 m par 100 m pour individualiser des carrés d'un hectare (annexe 1, figure A-1).

Le bloc a ensuite été préinventorié. Dans chaque carré, les diamètres de tous les arbres (avec un DHP supérieur à 10 cm) appartenant aux 36 espèces, ayant un intérêt commercial pour les compagnies forestières partenaires, ont été mesurés. Ces espèces représentent environ 15 % des espèces présentes dans ces forêts (annexe 1, tableau A-1).

Une 37<sup>e</sup> espèce, l'otungui (*Greenwayodendron suaveolens* Engl., Annonacée), a été ajoutée. Il s'agit d'une espèce commune et abondante, présente dans tous les sites étudiés par le projet DynAffor (de 5 à 25 arbres par hectare). Le suivi de sa dynamique est destiné à permettre une comparaison rigoureuse de ces sites, en éliminant l'effet de la composition spécifique.

La conformation du tronc des arbres inventoriés a été systématiquement notée pour pouvoir identifier les arbres les plus faciles à mesurer, et donc à suivre (« mesure possible à 1,30 m » ; « mesure à prendre au-dessus de 1,30 m » ; « mesure impossible »).

### Installation des parcelles permanentes

Quatre parcelles carrées de 9 ha (agrégation de 9 carrés de 1 ha du préinventaire), deux par bloc, ont été positionnées (voir en annexe 1, figure A-1 l'exemple du dispositif de Loundougou) de façon à ce qu'elles aient des effectifs similaires pour les espèces préinventoriées. Cette sélection des parcelles vise à contrôler l'effet de la composition spécifique sur la variabilité des dynamiques avant et après exploitation.

Ces parcelles ont été délimitées en s'appuyant sur le quadrillage des carrés effectué lors du préinventaire. Chaque coin de chacun des carrés a été localisé par un fossé de 60 cm de profondeur (photo 1).

### Installation des sentiers

Les priorités des deux compagnies partenaires dans la liste des 37 espèces inventoriées ne sont pas les mêmes. D'une part, selon les règles d'aménagement durable, les espèces doivent avoir une densité suffisante pour pouvoir être exploitées, or la composition floristique diffère entre les sites. D'autre part, les compagnies n'ont pas les mêmes clients.

Certaines des espèces inventoriées se sont révélées en effectif trop faible pour pouvoir être suivies. Finalement, 27 espèces à Loundougou (78,6 % des arbres préinventoriés) et 17 espèces à Mokabi (94,3 % des arbres préinventoriés), dont l'otungui, ont été retenues pour l'insertion dans les sentiers (annexe 1, tableau A-1).

Un sentier a donc été installé dans chaque bloc, en utilisant les données du préinventaire. Ce sentier n'est pas matérialisé et relie virtuellement, pour chacune des espèces sélectionnées, une partie des arbres préinventoriés. Afin d'estimer correctement le taux de reconstitution du stock de ces espèces (erreur généralement comprise entre 10 et 30 % à un niveau de confiance compris entre 80 et 95 %), pour chacune d'elles environ 200 arbres, soit 20 arbres par classe de diamètre de 10 cm, devaient être sélectionnés pour être mesurés chaque année (Picard et Gourlet-Fleury, 2008).

Pour les espèces ayant plus de 200 arbres dans chaque bloc, les 200 arbres du sentier ont été sélectionnés de la manière suivante : les arbres déjà présents dans



**Photo 2.**  
Installation d'un arbre : positionnement de l'anneau de peinture marquant la hauteur de mesure.  
Photo E. Forni.



**Photo 3.**  
Arbre avec hauteur de mesure rehaussée à 4,50 m.  
Photo S. Gourlet-Fleury.

les parcelles ont été intégrés ; tous les arbres situés dans les classes de diamètre possédant moins de 20 individus, c'est-à-dire en général les classes de plus de 40 cm de diamètre, ont également été intégrés ; les arbres appartenant aux classes de diamètre les plus abondantes (en général les petites classes) ont été tirés au hasard, en mettant une priorité sur les arbres situés dans les deux parcelles de 9 ha.

Pour les espèces ayant moins de 200 arbres dans le bloc, tous les arbres ont été sélectionnés quel que soit leur effectif par classe de diamètre. L'édition de cartes de localisation des arbres des sentiers à partir des données du pré-inventaire est recommandée et procure un gain de temps significatif lors des campagnes de mesure ultérieures.

La mise en place et le suivi des sentiers sont des opérations coûteuses en temps. Les variables mesurées, en particulier le diamètre, sont donc concentrées sur les arbres des sentiers, et aucune information n'est prise sur leur voisinage. L'analyse de la croissance et de la mortalité des espèces

concernées ne peut donc se faire qu'en fonction du diamètre des arbres, alors que, sur les parcelles, il est possible de prendre également en compte leur environnement. Mais cela permet de mettre en évidence et de quantifier les biais générés par des modèles de croissance ou de mortalité calés uniquement sur les arbres suivis dans les parcelles, dont l'effectif est trop faible, en particulier dans les classes de diamètre  $\geq 40$  cm DHP. La prise en compte des environnements le long des sentiers pourra faire l'objet de recherches futures.

### Opérations sur les arbres

Dans les parcelles et sur les sentiers, tous les arbres ayant un DHP  $\geq 10$  cm ont été identifiés, numérotés, et mesurés avec précision (diamètre au mm près, et niveau de mesure en cm) avec marquage à la peinture du numéro de l'arbre et du niveau de mesure par un anneau rectiligne continu et perpendiculaire au tronc (photo 2).

Lorsque les troncs présentaient des déformations à 1,30 m (blessures, chancres, irrégularités, contreforts), les anneaux de peinture ont été rehaussés à différentes hauteurs, et au maximum à 4,50 m, en particulier en cas de prévision d'un développement rapide des contreforts (photo 3). Les règles suivies pour les différents problèmes rencontrés sur les arbres (troncs déformés mais aussi arbres penchés, situés sur des pentes.) figurent dans Picard et Gourlet-Fleury (2008).

Dans les parcelles, les coordonnées géographiques de chaque arbre ont été déterminées le plus précisément possible au moyen d'un quadrillage intermédiaire (10 m x 10 m ou 25 m x 25 m selon la composition du sous-bois et la visibilité au sein des carrés d'un hectare). Les coordonnées des arbres sur les sentiers ont été reprises au GPS.

## Bilans

Nous présentons, dans la section suivante, un bilan technique et financier des différentes opérations réalisées dans chaque dispositif. Nous analysons ensuite les résultats issus des préinventaires et les méthodes suivies pour sélectionner les parcelles sur les deux sites, parcelles dont nous caractérisons brièvement la structure.

### Bilan technique et financier

#### Organisation du travail et coûts salariaux

L'installation des dispositifs a été prise en charge par les compagnies partenaires. Chaque société a constitué une équipe de huit personnes pour réaliser les travaux. Son coût mensuel est d'environ 3 000 € en moyenne (tableau I). Ce coût peut varier en fonction de la qualification et de l'ancienneté des membres de l'équipe.

Nous estimons la supervision des travaux par un cadre de l'entreprise à 2 300 € sur l'année d'installation. Les coûts de supervision scientifique par les chercheurs n'ont pas été pris en compte.

#### Installation et préinventaire d'un bloc

Le layonnage des blocs a été sous-traité à un opérateur privé à Loudoungou, et a été réalisé en régie à Mokabi. Sur chaque dispositif, soit deux blocs jointifs d'une superficie

**Tableau I.**  
 Coût mensuel d'une équipe type, petit matériel et fonctionnement compris.

Équipe type (charges comprises)/mois	P.U. (FCFA)	Nombre	Total (FCFA)	Total (€)
Chef d'équipe	300 000	1	300 000	457
Compteurs	220 000	4	880 000	1 341
Manœuvres	135 000	2	270 000	412
Gardien	120 000	1	120 000	183
Sous-total personnel		8	1 570 000	2 393
Ration	2 000	192	384 000	585
<b>Total</b>			<b>1 954 000</b>	<b>2 978</b>

**Tableau II.**  
 Temps et coûts des activités d'installation et de suivi d'un dispositif complet par site (Loundoungou, Mokabi), par bloc (O : ouest, E : est, N : nord, S : sud) et par parcelle (P1 : parcelle 1, P2 : parcelle 2). Les moyennes (Moy) et l'erreur standard (sd) sont calculées par site et sur les deux sites.

Activités	Temps travaillé (jours)										Temps réel (mois) Moy	Coût (€) Moy	Coût (€) Dispositif complet	
	Loundoungou					Moy	Mokabi							Moy ± sd
	Bloc O		Bloc E		Moy		Bloc N		Bloc S					
P1	P2	P1	P2	Moy		P1	P2	P1	P2	Moy	Moy ± sd			
Layonnage des blocs	49		40		44,5	42		41		41,5	43 ± 4,1	2,05	6 100	12 200
Préinventaire des blocs	108		110		109	104		101		102,5	105,8 ± 4,0	5,04	15 001	30 002
Installation et mesure des parcelles	64	68	47	49	57	54	54	50	56	53,5	55,3 ± 7,3	2,63	7 838	31 352
1 <sup>re</sup> campagne de remesure des parcelles	8	7	10	6	7,75	7	7	7	7	7	7,4 ± 1,2	0,35	1 046	
2 <sup>e</sup> campagne de remesure des parcelles	9	9	7	7	8	8	9	8	8	8,25	8,1 ± 0,8	0,39	1 153	
Installation et mesure des sentiers	72		77		74,5	72		75		73,5	74 ± 2,4	3,52	10 497	20 994
Campagne de remesure des sentiers	26		25		25,5	22		25		23,5	24,5 ± 1,7	1,17	3 476	
<b>Total installation dispositif complet</b>														<b>94 548</b>

totale de 800 ha (4 km x 2 km), 83 km de layons ont été ouverts en deux mois au rythme de 3 km/jour. Le layonnage a coûté en moyenne 6 100 € (environ 45 hommes-jours, HJ) par bloc.

Le préinventaire a été réalisé par les équipes de chaque société. Il a pris en moyenne 106 jours de travail (y compris les arrêts causés par la pluie) par bloc, soit environ 5 mois en tenant compte des repos de quinzaine et de fin du mois. Il a coûté en moyenne 15 000 € par bloc (tableau II).

#### Installation et mesure d'une parcelle et d'un sentier

L'installation et la première mesure d'une parcelle de 9 ha ont nécessité en moyenne 55 jours de travail, soit 2,6 mois par parcelle en tenant compte des temps de repos. Le coût moyen a été d'environ 7 800 €. Les deux premières campagnes de remesure ont nécessité, respectivement, en moyenne 7 à 8 jours de travail, soit environ 0,4 mois en tenant compte des temps de repos, donnant un coût moyen d'environ 1 100 € par parcelle de 9 ha.

L'installation et la première mesure d'un sentier ont nécessité en moyenne 74 jours de travail, soit 3,5 mois au total. Le coût moyen a été de 10 500 €. Sa remesure a nécessité en moyenne 25 jours de travail, soit 1,2 mois en tenant compte des temps de repos. Le coût moyen de la remesure a été d'environ 3 500 € par sentier.

### Bilan pour un dispositif complet

L'installation et la première mesure d'un dispositif complet, comprenant au total deux blocs de 400 ha, quatre parcelles et deux sentiers, a nécessité en moyenne 667 jours de travail, soit environ 32 mois et coûté environ 94 500 € (tableau II).

Les deux mois de layonnage ont été réalisés par une équipe spécifique, pendant que l'équipe de comptage procédait au préinventaire.

### Bilan écologique

Les analyses présentées ci-dessous ont été réalisées avec le logiciel R (R Core Team, 2017), et en particulier la librairie *Biomass*.

### Effectifs des espèces d'intérêt prioritaire au sein des blocs et conséquences sur la sélection des parcelles

#### Effectifs inventoriés

À Loundoungou, un total de 45 315 arbres (21 815 arbres dans le bloc ouest et 23 500 arbres dans le bloc est), soit 56,6 arbres/ha en moyenne, ont été préinventoriés. À Mokabi, ces effectifs se sont élevés à 48 420 arbres (25 583 arbres dans le bloc nord et 22 837 arbres dans le bloc sud), soit 60,5 arbres/ha. Parmi les 37 espèces préinventoriées, *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. (ayous) n'a été trouvé sur aucun des deux sites, et *Gilbertiodendron dewevrei* (De Wild) J. Léonard (limbali) n'a pas été trouvé à Mokabi (annexe 1, tableau A-I).

#### Sélection des parcelles

L'objectif de la sélection des parcelles était d'obtenir des parcelles ayant des effectifs similaires pour les espèces préinventoriées. La sélection a été effectuée en minimisant l'indice de dissimilarité de Bray-Curtis (Bray et Curtis, 1957) qui est calculé à partir de l'abondance des espèces. Pour deux parcelles k et l, avec p espèces inventoriées, l'indice est calculé de la manière suivante :

$$BC_{k,l} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^{i=p} \min(n_{k,i}, n_{l,i})}{\sum_{i=1}^{i=p} (n_{k,i} + n_{l,i})}$$

avec  $n_{k,i}$  : nombre d'arbres appartenant à l'espèce i dans la parcelle k..

Pour sélectionner les parcelles, nous avons exclu des 37 espèces inventoriées le limbali, le nivô (*Staudtia kamerunensis* Warb. var. *gabonensis* (Warb.) Fouilloy) et l'otungui, s'agissant d'espèces beaucoup plus abondantes que les autres. Si elles avaient été conservées, la procédure de sélection aurait retenu les parcelles ayant des effectifs comparables pour ces trois espèces sans réellement prendre en compte les autres.

La méthode de sélection a dû être adaptée aux aléas du déroulement des opérations de terrain. Pour le site de Mokabi, l'indice a été calculé pour chaque configuration de

quatre parcelles (deux dans chacun des blocs) potentielles ne se chevauchant pas. Pour toutes les configurations possibles des parcelles k, l, q et r, les sommes des dissimilarités floristiques  $SBC_4 = BC_{k,m} + BC_{l,m} + BC_{q,m} + BC_{r,m}$  ont été calculées ; m désigne une parcelle virtuelle dont les effectifs des espèces correspondent à la moyenne des effectifs des parcelles k, l, q et r. Les quatre parcelles minimisant la somme des dissimilarités ont été retenues.

Sur le site de Loundoungou, à cause du retard dans le déroulement des opérations et de l'approche de la date d'exploitation, le choix des parcelles a été réalisé d'une manière légèrement différente. Dès le préinventaire terminé sur le premier bloc, les deux premières parcelles les plus proches floristiquement ont été sélectionnées à l'aide de l'indice de Bray-Curtis. La dissimilarité floristique  $BC_{k,l}$  a ainsi été calculée pour toutes les configurations possibles de deux parcelles k et l ne se chevauchant pas, afin de pouvoir démarrer leur inventaire. Une fois le préinventaire du deuxième bloc terminé, pour toutes les configurations possibles de deux parcelles q et r ne se chevauchant pas sur le deuxième bloc, la somme des dissimilarités floristiques  $SBC_2 = BC_{q,m} + BC_{r,m}$  a été calculée ; m est la parcelle virtuelle dont les effectifs des espèces correspondent à la moyenne des effectifs des parcelles k et l installées dans le premier bloc. Les deux parcelles minimisant la somme des dissimilarités ont été retenues.

#### Effets de la différence de méthode de sélection des parcelles entre les sites

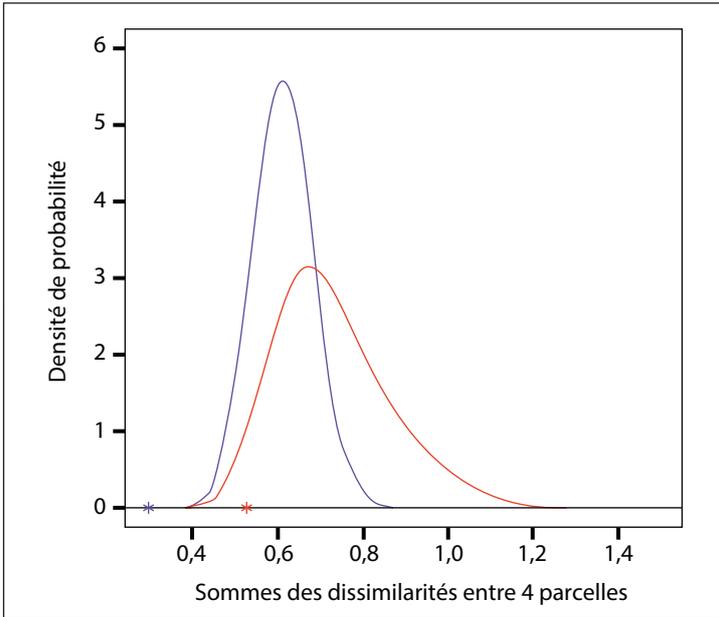
Les scores  $SBC_4$  obtenus pour les quatre parcelles installées à Loundoungou et Mokabi sont respectivement de 0,53 et 0,29. Si les parcelles de Loundoungou avaient été sélectionnées de la même manière qu'à Mokabi, le score  $SBC_4$  aurait été de 0,31. La conséquence est que la part de variabilité dans la dynamique des parcelles de Loundoungou due à la diversité spécifique est potentiellement plus élevée. Cependant, des parcelles ainsi sélectionnées en minimisant un critère de dissimilarité ne sont pas adaptées pour comparer la diversité spécifique entre les deux sites. Pour ce faire, les quatre parcelles sélectionnées auraient dû avoir un  $SCB_4$  voisin de 0,6 à Mokabi et de 0,65 à Loundoungou, c'est-à-dire les valeurs les plus fréquentes sur chacun des sites (figure 2).

#### Installation des sentiers

Suite à la sélection et à l'inventaire complet des parcelles, les sentiers ont été tracés dans les blocs en privilégiant les arbres présents dans les parcelles (voir ci-avant).

### Principales caractéristiques des parcelles de 9 ha

Au total, 240 espèces ont été inventoriées sur les quatre parcelles de Loundoungou et 230 espèces sur les quatre parcelles de Mokabi. Un ensemble de 192 espèces ont été trouvées dans les deux sites, mais avec parfois des abondances très différentes ; 48 espèces ont été trouvées uniquement à Loundoungou et 38 espèces uniquement à Mokabi. À Loundoungou, les cinq familles dominantes sont les Euphorbiaceae (~ 20 %), les Fabaceae (~ 12 %), les Meliaceae (~ 9 %), les Ebenaceae (~ 8 %) et les Annonaceae (~ 7 %). À Mokabi, les cinq familles dominantes sont les Euphorbiaceae (~ 27 %), les Clusiaceae (~ 9 %), les Annonaceae (~ 9 %), les Sapotaceae (~ 8 %) et les Fabaceae (~ 5 %).



**Figure 2.** Distributions des valeurs  $SBC_4$  ( $SBC_4 = BC_{k,m} + BC_{l,m} + BC_{q,m} + BC_{r,m}$ ), la somme des dissimilarités de Bray-Curtis calculée pour quatre parcelles de 9 ha non chevauchantes k, l, q et r, avec  $BC_{k,i} = 1 - 2\sum(n_{k,i}n_{l,i}) / \sum(n_{k,i} + n_{l,i})$  et  $n_{k,i}$  le nombre d'arbres appartenant à l'espèce i dans la parcelle k). (\*) Valeur de  $SBC_4$  pour les quatre parcelles installées (rouge : site de Loundoungou, bleu : site de Mokabi).

Les structures mesurées sur les parcelles montrent une nette différence entre les deux dispositifs (tableau III). Les effectifs et la surface terrière des peuplements à Loundoungou sont significativement moins élevés qu'à Mokabi, mais il n'y a pas de différence significative sur la biomasse (tests t de Welch :  $t = 136,3$ , p-value < 0,001 ;  $t = 3\,489,343$ , p-value = 0,003 ;  $t = 2,600$ , p-value = 0,1123 respectivement, distributions normales et variances inégales).

### Principales caractéristiques des sentiers

À Loundoungou, seules 14 des 27 espèces recherchées disposaient de plus de 200 individus dans chaque bloc. À Mokabi, seules 14 des 17 espèces présentaient cette caractéristique (annexe 1, tableau A-I).

Au total, à Loundoungou, les deux sentiers de chacun des blocs contiennent 4 191 et 4 344 arbres suivis ; à Mokabi, ils en contiennent 3 858 et 3 878 (tableau IV).

## Discussion

Un des principaux objectifs du projet DynAffor, l'installation des plus grands dispositifs de suivi en Afrique centrale, a été atteint. Les dispositifs vont permettre, à terme, de mieux appréhender la réponse des forêts d'Afrique centrale à l'exploitation du bois d'œuvre. Ils permettent dès à présent d'avoir des informations sur la variabilité de la diversité et de la structure des peuplements.

L'installation des dispositifs a été réalisée en s'appuyant sur le protocole théorique décrit précédemment. Lors de sa mise en œuvre, plusieurs difficultés ont émergé ; les façons dont elles ont été surmontées sont discutées ci-après.

### Trouver l'emplacement assurant tous les critères nécessaires à l'installation d'un dispositif peut être difficile

Le critère « intact », seul moyen d'estimer rigoureusement les effets du sol, les effets de l'exploitation forestière, et de leur interaction, était fondamental pour l'installation des dispositifs. À ce critère devait s'ajouter la présence d'un effectif suffisant d'espèces exploitées par les compagnies, la présence d'un cours d'eau auprès duquel installer un campement, et la proximité d'une piste d'accès permanent au dispositif. Enfin, la zone retenue devait être située dans une assiette de coupe prévue à une date permettant l'installation et le suivi du dispositif complet durant un temps suffisant avant l'exploitation.

Alors que le dispositif de Loundoungou a pu être installé dans une zone idéalement située, dans une assiette de coupe programmée en 2017 puis repoussée à 2018, la situation a été beaucoup plus compliquée pour le dispositif de Mokabi. Croiser une densité suffisante d'espèces exploitables avec la faible densité de cours d'eau présents dans la zone située sur les grès de Carnot et contraignant l'installation d'un campement a pris du temps. Le dispositif a été installé à environ 7 km en moyenne du campement, impliquant un trajet quotidien de 8 à 16 km pour le couvrir, du coin le plus proche au coin le plus éloigné. Le choix final s'est malheureusement révélé incompatible avec la programmation des assiettes de coupe sur la concession, le dispositif se retrouvant dans l'UFP 5, dont l'exploitation est prévue entre 2029 et 2033. Le suivi ne pourra donc se faire, dans un premier temps, que sur des blocs intacts.

**Tableau III.**

Principales caractéristiques structurales des forêts sur les quatre parcelles de chaque dispositif : moyenne ( $\pm$  erreur standard) de N (effectifs), G (surface terrière) et AGB (biomasse aérienne). AGB estimée avec l'équation (4) de Chave *et al.* (2014) :  $AGB = 0,0673 \times (\rho DHP^2 H)^{0,976}$ , avec  $\rho$  : densité du bois de chaque espèce (base Dryad, Zanne *et al.*, 2009), et H : hauteur totale de l'arbre estimée avec l'équation de Feldpausch *et al.* (2012) pour la région Afrique centrale :  $H = 50,453(1 - \exp(-0,0471DHP^{0,812}))$ .

Dispositif	N/ha ( $\pm$ sd)	G m <sup>2</sup> /ha ( $\pm$ sd)	AGB Mg/ha ( $\pm$ sd)	Nombre total d'espèces
Loundoungou	346,8 ( $\pm$ 5,8)	27,6 ( $\pm$ 0,6)	432,6 ( $\pm$ 13,8)	240
Mokabi	426,8 ( $\pm$ 3,6)	29,7 ( $\pm$ 0,4)	457,3 ( $\pm$ 9,3)	230

**Tableau IV.**

Effectif des arbres suivis sur les sentiers des deux dispositifs.

Dispositif	Nombre d'espèces	Bloc	Nombre d'arbres (hors parcelle)	Nombre d'arbres (parcelles incluses)
Loundoungou	27	Ouest	3 131	4 191
		Est	3 369	4 344
Mokabi	17	Sud	2 320	3 858
		Nord	2 420	3 878

### Choisir le critère de localisation des parcelles est complexe

Parmi les indices de dissimilarité utilisant les données d'abondance, nous avons choisi l'indice de Bray-Curtis car il est moins sensible aux ordres de grandeur relatifs des abondances que ceux basés sur la distance euclidienne (Legendre et Legendre, 2012). De plus, son principal défaut d'accorder trop d'importance aux espèces très abondantes serait plutôt un avantage dans notre contexte. En effet, il est important que les parcelles contiennent plusieurs arbres exploitables, de façon à ce que la perturbation induite sur la parcelle par l'exploitation soit significative. Il n'y avait pas lieu d'utiliser ses variantes corrigeant ce défaut (Gower, 1971 ; Anderson *et al.*, 2006).

Pour des raisons opérationnelles, il n'a pas été possible de suivre exactement la même méthode sur les deux sites pour déterminer la localisation des parcelles. De ce fait, les parcelles de Loundoungou présentent une plus grande diversité bêta,  $SBC_4 = 0,53$ , que si elles avaient été choisies selon la même méthode qu'à Mokabi,  $SBC_4 = 0,31$ . Cependant, le site de Loundoungou est significativement plus hétérogène que le site de Mokabi (test de Wilcoxon,  $p$ -value <  $2.2e^{-16}$ ).

Ainsi, la méthode choisie a conduit à installer des parcelles non représentatives de la différence d'hétérogénéité existant entre les deux sites, ni même représentatives de l'hétérogénéité intra-site. Cependant, cette méthode est cohérente avec l'objectif principal du projet DynAfFor : étudier la variabilité des dynamiques forestières par rapport aux facteurs « exploitation », « climat » et « sol ». Le facteur « composition spécifique » est contrôlé grâce à cette méthode.

#### Les arbres à suivre sur les sentiers doivent être sélectionnés strictement aléatoirement

Les arbres constituant les sentiers ont été tirés au hasard à partir des données du préinventaire, et leur localisation a été transmise aux équipes. Sur le terrain, cependant, lorsqu'un arbre présentait des défauts sur tout le tronc (y compris peu importants), il a été abandonné. Cette décision ne pose pas problème lorsqu'il s'agit de remplacer un arbre mal conformé par un arbre mieux conformé mais présentant la même vigueur. Ce qui pose problème, en revanche, est d'abandonner un arbre présentant un signe de

dépérissement. En effet, deux processus doivent être évalués sur les sentiers : la croissance, qui nécessite d'équiper des arbres bien conformés, et la mortalité, qui nécessite de suivre des arbres indépendamment de leur vigueur apparente (et donc tirés au hasard dans la population de chaque espèce). Abandonner des arbres dépérissants entraîne nécessairement une sous-estimation de la mortalité, particulièrement dommageable lorsqu'il s'agit de prédire des taux de reconstitution de la ressource.

#### Appliquer rigoureusement le protocole de mesure du diamètre des arbres reste compliqué

Bien localiser le niveau de mesure de la circonférence ou du diamètre sur le tronc d'un arbre n'est pas simple. D'une manière générale, les consignes ont été bien comprises par les équipes de Loundoungou et de Mokabi, qui ont fait des efforts clairs de réflexion avant de prendre une décision. Certaines difficultés ont cependant dû être plus particulièrement abordées.

#### L'appréciation du degré de circularité des troncs

Les équipes ont eu tendance à souvent remonter le niveau de mesure au-dessus de 1,30 m, dès que de légers défauts apparaissaient. Dans certains cas, moins fréquents, l'anneau de peinture a été placé à 1,30 m sur des contreforts ou des empâtements, alors qu'il aurait dû être rehaussé.

#### Le déplacement du niveau de mesure

Environ 20 % et 14 % des arbres ont eu leur niveau de mesure déplacé à Loundoungou et à Mokabi. Parmi ces arbres, 32 % à Loundoungou et 7 % à Mokabi ont eu leur peinture placée à 4,50 m. Cette différence correspond à la réalité de terrain, les arbres étant globalement mieux conformés à Mokabi qu'à Loundoungou. De plus, la présence de grosses termitières se développant contre ou autour du tronc a posé des difficultés pour localiser la base de l'arbre et, par conséquent, pour connaître la hauteur de mesure du diamètre. Dans ce cas, la recommandation a été de positionner l'anneau de peinture à la plus petite hauteur accessible, lorsque la base du tronc est visible, ou à 1,30 m au-dessus du sommet de la termitière lorsque la base est invisible (annexe 1, figure A-5).

La consigne d'installation des niveaux de mesure à 4,50 m a posé problème pour différentes raisons. Selon Picard et Gourlet-Fleury (2008), 4,50 m est une hauteur de mesure de référence pour les arbres présentant de gros « défauts » sur leur tronc, au-delà de 1,80 m (blessures, chancres, empattements...) ou présentant des contreforts à développement rapide comme le padouk. Et il ne faut remonter ou redescendre l'anneau de peinture qu'en cas de défaut majeur rencontré à 4,50 m. Cependant, dans de nombreux cas, l'anneau a été positionné entre 1,80 m et 4 m lorsque le tronc était bien circulaire, en particulier suite à un manque de disponibilité d'échelles de bonne taille.

Il faut rappeler l'importance de conserver le maximum d'arbres suivis à 1,30 m ( $\pm$  5 cm pour éviter un petit défaut localisé). En effet, toute modification de la hauteur entraîne la nécessité d'effectuer des corrections, donc une augmentation des incertitudes sur les diamètres, sur la biomasse et sur la vitesse de croissance des arbres. Les corrections seront réalisées de deux manières, en faisant l'hypothèse que la croissance de l'arbre a été nulle depuis la campagne précédente, pour établir le ratio entre le diamètre à la nouvelle hauteur et le DHP, ou en utilisant des relations établies à partir d'une série d'autres arbres à tronc non déformé, sur lesquels les diamètres sont suivis à différentes hauteurs (photo 4).

#### Installer des dispositifs complets a nécessité davantage de temps que prévu

L'installation complète des dispositifs a nécessité en moyenne 667 jours travaillés (soit environ 32 mois réels payés).

Aucun dispositif de ce type, permettant la comparaison, n'a été installé à ce jour. Selon une étude exhaustive sur les différents types de dispositifs de suivi mis en place en Amazonie, installer une parcelle carrée de 1 ha nécessite entre 7 et 35 hommes-jours de travail selon les contraintes du terrain (Baraloto *et al.*, 2013). Pour les deux dispositifs de Loundougou et de Mokabi, 48 hommes-jours de travail ont été en moyenne nécessaires pour installer chacune des sous-parcelles de 1 ha. Cette différence peut s'expliquer par le temps d'accès au campement et le temps d'accès aux parcelles. Dans le cas de l'installation d'une parcelle de 1 ha, un petit campement est généralement installé à proximité de la parcelle pour une semaine. Dans le cas de ces dispositifs, de gros campements ont été installés pour au moins une année et la contrainte d'être à proximité d'une rivière était très forte. Le temps d'accès au bloc pouvait atteindre une heure, à laquelle il fallait ajouter le temps d'accès à chaque parcelle au sein du bloc.

Le planning d'installation de chaque dispositif a été effectué à partir de l'étude théorique de Picard et Gourlet-Fleury (2008). Selon eux, cette installation nécessiterait environ 20 mois de travail, en doublant les équipes pour réaliser simultanément le layonnage et le préinventaire des blocs. Cet écart entre temps théorique et temps effectif est dû à différents facteurs détaillés ci-dessous.

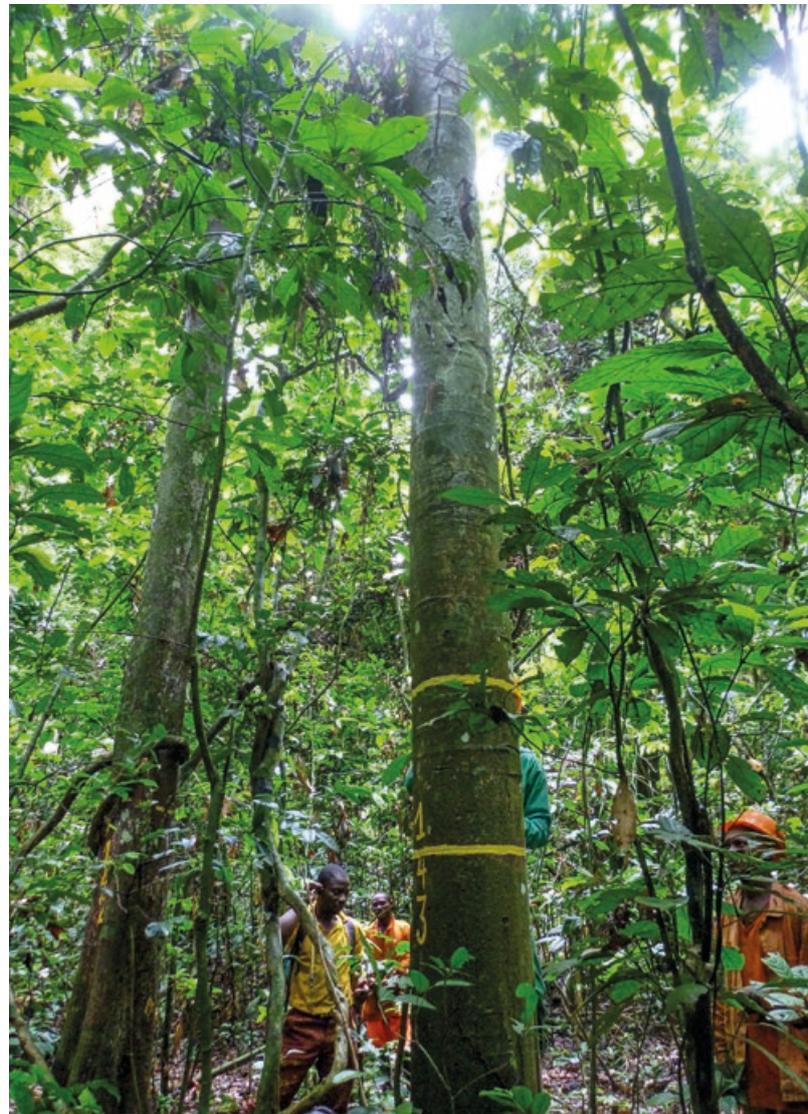
▪ *Ressources humaines.* Trente-six jours de travail supplémentaires ont été nécessaires pour reprendre la position des peintures sur deux parcelles de Loundougou, suite à un contrôle effectué trop tard par les chercheurs.

▪ *Activités.* Trente-sept espèces ont été recherchées dans les préinventaires, alors que la prise en compte d'une vingtaine d'espèces avait été initialement budgétée. Ce choix s'est traduit par le préinventaire de 4 ha par jour dans les blocs de 400 ha, au lieu des 6 ha par jour initialement programmés.

▪ *Programmation.* La fréquence des sorties et des entrées des équipes en forêt, ainsi que le congé annuel de ces dernières, ont été mal évalués. Par ailleurs, l'impossibilité de travailler lors des jours de pluie n'a pas été anticipée.

▪ *Logistique.* Les entrées et sorties des équipes ont dû être adaptées à la disponibilité des véhicules de transport.

Le temps requis pour l'installation des dispositifs s'est donc avéré supérieur à l'estimation théorique de Picard et Gourlet-Fleury (2008). Or, il n'y a pas eu de problème majeur retardant l'avancée des travaux, et le temps requis sur les deux sites a été similaire. Il est raisonnable de considérer que cette sous-estimation est due au fait que les aléas liés aux difficultés couramment rencontrées sur le terrain ont été sous-évalués.



**Photo 4.**

Mesures à plusieurs hauteurs (ici, trois dont une à 4,50 m) d'un arbre à tronc non déformé.

Photo S. Gourlet-Fleury.

## Recommandations

Étant donné les difficultés rencontrées pour localiser correctement des dispositifs de suivi de la dynamique forestière, cette localisation devrait être déterminée au moment de l'élaboration du plan d'aménagement d'une concession. Le critère utilisé pour localiser des parcelles dans des blocs devrait être choisi en fonction des objectifs de suivi du dispositif. Les dispositifs devraient par ailleurs toujours être installés sur deux zones, l'une restant non exploitée et l'autre passant en exploitation quelques années après son installation.

Par ailleurs, le retour d'expérience de l'installation de ces deux dispositifs amène à proposer une mise à jour du protocole de Picard et Gourlet-Fleury (2008) comme suit.

- **Localisation des arbres.** La densité des arbres étant faible à Loundoungou, leur localisation dans les parcelles a été effectuée à l'aide d'un quadrillage intermédiaire de 25 m x 25 m, au lieu du quadrillage de 10 m x 10 m utilisé à Mokabi. Cette maille s'est finalement révélée trop grande pour effectuer un positionnement correct des arbres. Il est donc recommandé de privilégier les mailles de 10 m x 10 m, quelle que soit la densité des peuplements inventoriés. Ceci aura peu d'impact sur le temps passé, chercher à localiser correctement des arbres dans de grandes mailles étant aussi long qu'installer des mailles plus petites au sein desquelles les arbres sont facilement localisables.

- **Mesure du diamètre.** Plusieurs cas de figure rencontrés ne sont pas abordés dans le manuel : arbres cassés avec rejets ou rejets depuis la base (annexe 1, figure A-3), arbres

réitérés (annexe 1, figure A-4), arbres contre ou sur une termitière (annexe 1, figure A-5), hauteur de mesure et numérotation des arbres fourchus (annexe 1, figure A-2). Des recommandations de mesure illustrées pour ces différents cas sont proposées en annexe 1.

- **Hauteur de mesure du diamètre.** Il faut privilégier au maximum la mesure à 1,30 m. Ainsi, les méplats du tronc ne doivent pas être considérés comme des défauts entraînant une rehausse. Tant que la courbure reste à peu près concave, il est possible de positionner l'anneau de peinture. Si l'anneau doit être déplacé, il faut éviter au maximum de le descendre en dessous de 1,30 m, pour éviter les surestimations de biomasse. Si l'anneau doit être remonté, la hauteur de 4,50 m est particulièrement importante dans le cas des arbres montrant un développement rapide des contreforts. Dans tous les autres cas, il faut privilégier la zone du tronc circulaire à partir de 1,30 m de hauteur, en notant la valeur de la nouvelle hauteur de mesure.

Pour des raisons de sécurité et de qualité, il faut impérativement disposer de deux échelles pour les mesures à 4,50 m.

Une recommandation pour les promoteurs de projets similaires serait d'utiliser comme valeurs de référence les données du bilan technique et financier du tableau II, plutôt que celles « optimistes » présentées dans Picard et Gourlet-Fleury (2008).

La dernière recommandation serait de réviser Picard et Gourlet-Fleury (2008) afin de mettre à jour le protocole d'inventaire et les temps requis pour les différentes étapes de l'installation.

### Annexe 1.

Parcelle 1 Ouest										Parcelle 2 Ouest										Parcelle 3 Est										Parcelle 4 Est									
20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
19	39	59	79	99	119	139	159	179	199	219	239	259	279	299	319	339	359	379	399	19	39	59	79	99	119	139	159	179	199	219	239	259	279	299	319	339	359	379	399
18	38	58	78	98	118	138	158	178	198	218	238	258	278	298	318	338	358	378	398	18	38	58	78	98	118	138	158	178	198	218	238	258	278	298	318	338	358	378	398
17	37	57	77	97	117	137	157	177	197	217	237	257	277	297	317	337	357	377	397	17	37	57	77	97	117	137	157	177	197	217	237	257	277	297	317	337	357	377	397
16	36	56	76	96	116	136	156	176	196	216	236	256	276	296	316	336	356	376	396	16	36	56	76	96	116	136	156	176	196	216	236	256	276	296	316	336	356	376	396
15	35	55	75	95	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	395	15	35	55	75	95	115	135	155	175	195	215	235	255	275	295	315	335	355	375	395
14	34	54	74	94	114	134	154	174	194	214	234	254	274	294	314	334	354	374	394	14	34	54	74	94	114	134	154	174	194	214	234	254	274	294	314	334	354	374	394
13	33	53	73	93	113	133	153	173	193	213	233	253	273	293	313	333	353	373	393	13	33	53	73	93	113	133	153	173	193	213	233	253	273	293	313	333	353	373	393
12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332	352	372	392	12	32	52	72	92	112	132	152	172	192	212	232	252	272	292	312	332	352	372	392
11	31	51	71	91	111	131	151	171	191	211	231	251	271	291	311	331	351	371	391	11	31	51	71	91	111	131	151	171	191	211	231	251	271	291	311	331	351	371	391
10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390
9	29	49	69	89	109	129	149	169	189	209	229	249	269	289	309	329	349	369	389	9	29	49	69	89	109	129	149	169	189	209	229	249	269	289	309	329	349	369	389
8	28	48	68	88	108	128	148	168	188	208	228	248	268	288	308	328	348	368	388	8	28	48	68	88	108	128	148	168	188	208	228	248	268	288	308	328	348	368	388
7	27	47	67	87	107	127	147	167	187	207	227	247	267	287	307	327	347	367	387	7	27	47	67	87	107	127	147	167	187	207	227	247	267	287	307	327	347	367	387
6	26	46	66	86	106	126	146	166	186	206	226	246	266	286	306	326	346	366	386	6	26	46	66	86	106	126	146	166	186	206	226	246	266	286	306	326	346	366	386
5	25	45	65	85	105	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	385	5	25	45	65	85	105	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345	365	385
4	24	44	64	84	104	124	144	164	184	204	224	244	264	284	304	324	344	364	384	4	24	44	64	84	104	124	144	164	184	204	224	244	264	284	304	324	344	364	384
3	23	43	63	83	103	123	143	163	183	203	223	243	263	283	303	323	343	363	383	3	23	43	63	83	103	123	143	163	183	203	223	243	263	283	303	323	343	363	383
2	22	42	62	82	102	122	142	162	182	202	222	242	262	282	302	322	342	362	382	2	22	42	62	82	102	122	142	162	182	202	222	242	262	282	302	322	342	362	382
1	21	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221	241	261	281	301	321	341	361	381	1	21	41	61	81	101	121	141	161	181	201	221	241	261	281	301	321	341	361	381

Figure A-1.

Sélection de deux parcelles de 9 ha par bloc, dans chacun des deux blocs. Exemple du dispositif de Loundoungou.

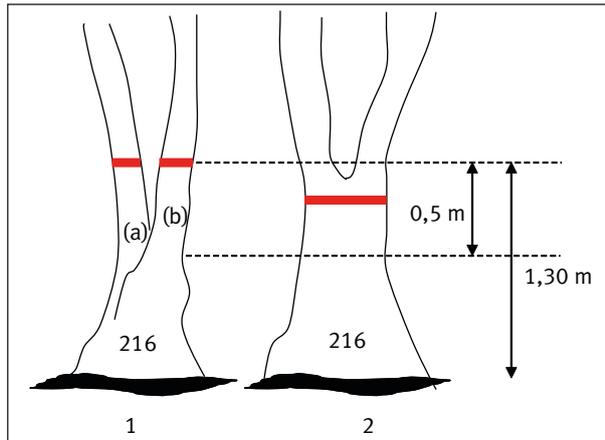
Annexe 1 (suite).

**Tableau A-I.**

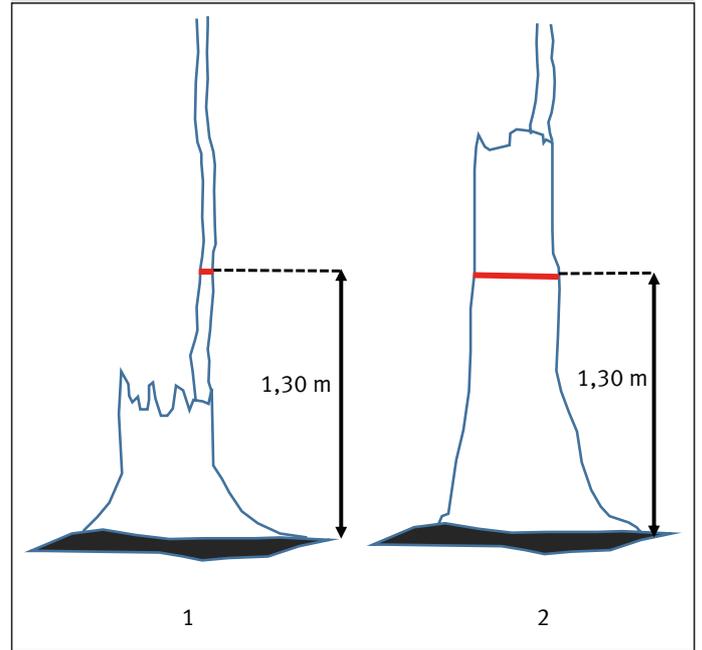
Liste et effectifs des espèces d'intérêt prioritaire recensées lors des préinventaires des blocs sur les deux sites et suivies sur les sentiers. N.B. : Les espèces suivantes d'intérêt prioritaire recensées lors des préinventaires des blocs sur les deux sites et non suivies sont : acajou blanc (*Khaya anthotheca*), aniégré (*Pouteria altissima*), ayous (*Triplochiton scleroxylon*), essessang (*Ricinodendron heudelotii*), eveuss (*Klainedoxa gabonensis*), fraké (*Terminalia superba*), iroko (*Milicia excelsa*), koto (*Pterygota bequaertii*).

Code espèce	Nom pilote	Nom scientifique	Famille	Sites			
				Loundougou Bloc ouest	Loundougou Bloc est	Mokabi Bloc nord	Mokabi Bloc sud
AIE	Aiélé	<i>Canarium schweinfurthii</i>	Burseraceae	66	82		
AZO	Azobé	<i>Lophira alata</i>	Ochnaceae	62	78		
BIL	Bilinga	<i>Nauclea diderrichii</i>	Rubiaceae	62	54		
BOC	Bossé clair	<i>Guarea cedrata</i>	Meliaceae	96	138		
DAB	Dabéma	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	Mimosaceae	348	506		
DIB	Dibétou	<i>Lovoa trichilioides</i>	Meliaceae	104	115		
DOU	Doussié	<i>Azelia bipindensis</i>	Caesalpiniaceae	130	187		
EBE	Ébène noir	<i>Diospyros crassiflora</i>	Ebenaceae	461	609	214	362
ETI	Etimoé	<i>Copaifera mildbraedii</i>	Caesalpiniaceae	130	100		
EYO	Eyong	<i>Eribroma oblongum</i>	Sterculiaceae	139	208		
ILO	Ilomba	<i>Pycnanthus angolensis</i>	Myristicaceae	820	1 076	776	720
KOS	Kosipo	<i>Entandrophragma candollei</i>	Meliaceae	684	904	610	631
KTB	Kotibé	<i>Nesogordonia kabingaensis</i>	Sterculiaceae	1 030	1 762	723	1 209
LAB	Longhi abam	<i>Chrysophyllum lacourtianum</i>	Sapotaceae	182	172		
LAT	Lati 1	<i>Amphimas pterocarpoides</i>	Caesalpiniaceae	336	412	279	227
LBE	Longhi beguei	<i>Chrysophyllum beguei</i>	Sapotaceae			106	422
MUK	Mukulungu	<i>Autranella congolensis</i>	Sapotaceae	81	82	66	67
NIV	Niové	<i>Staudtia kamerunensis</i> <i>var. gabonensis</i>	Myristicaceae	3 470	4 246	6 154	6 028
OTU	Otungui	<i>Greenwayodendron suaveolens</i>	Annonaceae	3 751	4 067	8 871	5 666
OWO	Owom	<i>Manilkara mabokeensis</i>	Sapotaceae	705	765	1 970	1 538
PAD	Padouk	<i>Pterocarpus soyauxii</i>	Papilionaceae	1 017	1 189	1 023	1 156
PAO	Pao rosa	<i>Bobgunnia fistuloides</i>	Papilionaceae	31	37		
SAP	Sapelli	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	Meliaceae	548	832	646	817
SIP	Sipo	<i>Entandrophragma utile</i>	Meliaceae	105	107	34	86
TAL	Tali	<i>Erythrophleum suaveolens</i>	Caesalpiniaceae	342	341	256	432
TCH	Tchitola	<i>Prioria oxyphylla</i>	Caesalpiniaceae			1 184	1 207
TIA	Tiama blanc	<i>Entandrophragma angolense</i>	Meliaceae	626	744	325	398
WAM	Wamba 1	<i>Tessmannia africana</i>	Caesalpiniaceae	720	602	684	769
YAT	latandza	<i>Albizia ferruginea</i>	Mimosaceae	38	115		

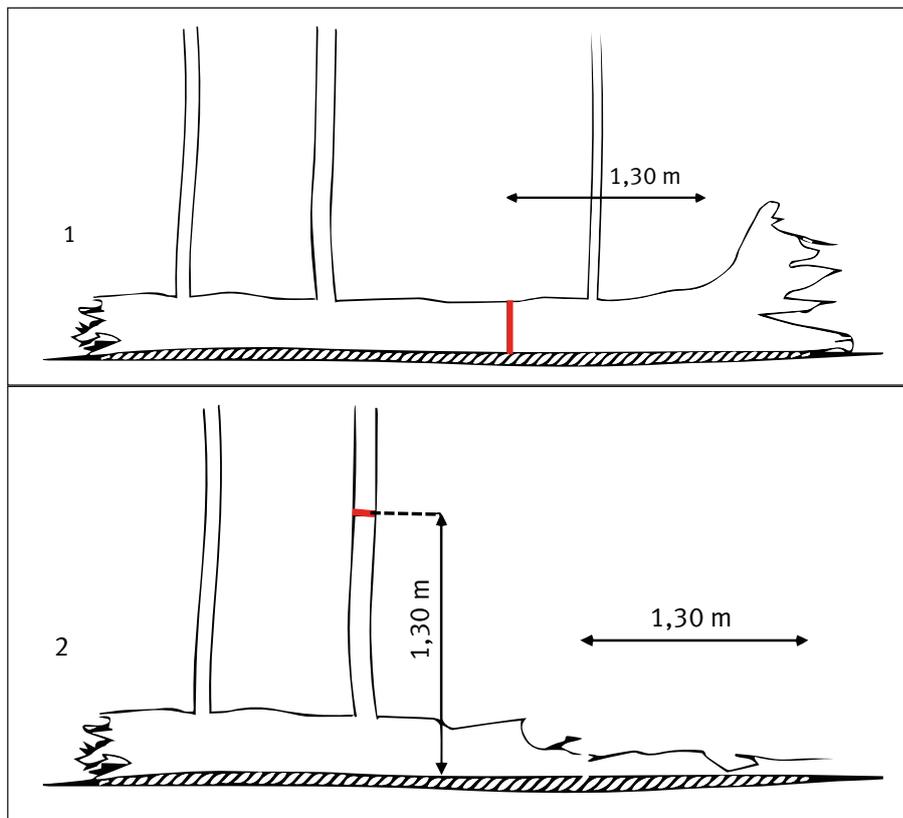
## Annexe 1 (suite).

**Figure A-2.**

Mesure des arbres présentant une fourche. Le protocole de mesure (Picard et Gourlet-Fleury, 2008) ne change pas, mais les arbres doivent être notés différemment. (1) Dans le cas d'une fourche apparaissant en dessous de 1,30 m, chacune des tiges doit avoir le même numéro d'arbre, associé à une lettre (a et b dans ce cas). Si possible, la mesure du diamètre doit être faite au même niveau sur les deux tiges. (2) Dans le cas d'une fourche apparaissant à 1,30 m, mieux vaut réaliser une mesure du tronc unique, quitte à baisser légèrement le trait de peinture d'au maximum 50 cm.

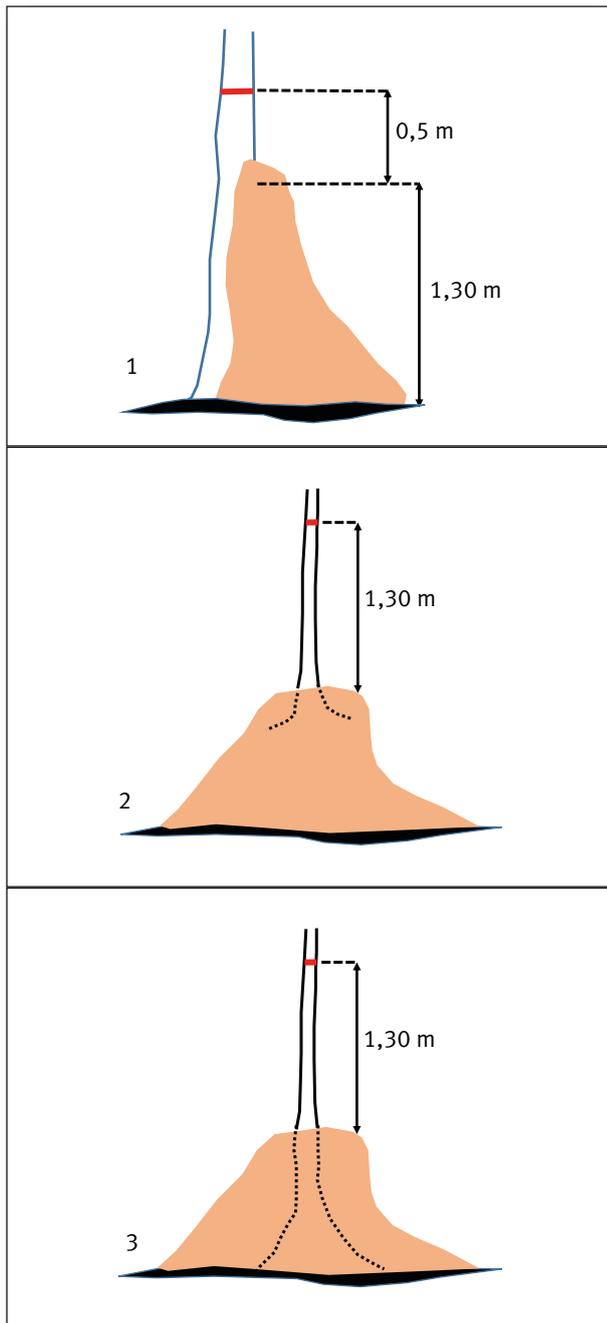
**Figure A-3.**

Mesure des arbres cassés présentant un rejet. La mesure doit être prise à 1,30 m (1) au-dessus de la casse ou (2) en dessous de la casse, mais l'observation « arbre cassé » est indispensable. Il faut également ajouter, dans l'observation, la hauteur à laquelle la casse est intervenue.

**Figure A-4.**

Mesure des arbres couchés, réitérés. (1) Lorsque le tronc est toujours vivant et que la mesure peut toujours être réalisée sur le tronc couché, il faut poursuivre cette mesure à ce seul endroit, même si certaines des tiges réitérées ont dépassé un DHP de 10 cm. Ces réitérations permettent à l'arbre, comme s'il s'agissait des grosses branches du houppier, de capter la lumière et de poursuivre sa croissance. (2) Lorsque le tronc est dégradé et que la mesure à 1,30 m ne peut plus être faite, il faut alors mesurer la (ou les) réitération(s) ayant dépassé un DHP de 10 cm. Chacune des réitérations doit avoir le même numéro d'arbre, associé à une lettre (a, b, c...).

Annexe 1 (suite).



**Figure A-5.** Mesure des arbres couverts par ou développés dans les termitières. (1) Lorsque le tronc est bien visible, l'anneau de mesure doit être remonté selon les mêmes règles que celles qui sont utilisées pour les arbres à tronc déformé. (2) et (3) Lorsque la base du tronc est invisible, et quelle que soit la position probable de l'arbre dans la termitière – l'arbre s'est installé dans la termitière (2) ou bien la termitière s'est installée sur l'arbre (3) –, l'anneau de mesure doit être placé à 1,30 m.

**Remerciements**

Nos remerciements vont au Fonds français pour l'environnement mondial et à l'Agence française de développement qui cofinancent le projet DynAffor à l'origine de ces travaux (Conventions CZZ 1636.01 D et CZZ 1636.02 E). Nous remercions également les sociétés forestières CIB-Olam et Mokabi SA (groupe Rougier) pour l'organisation logistique qui a permis d'installer ces dispositifs dans les meilleures conditions. Tous nos remerciements aussi à chacun des membres des équipes de terrain qui n'ont pas ménagé leurs forces pour réaliser les travaux avec sérieux et bonne humeur. Nous avons enfin une pensée particulière pour l'un d'entre eux, Issa Mogbaya, décédé pendant la période des travaux.

**Références bibliographiques**

Anderson M. J., Ellingsen K. E., McArdle B. H., 2006. Multivariate dispersion as a measure of beta diversity. *Ecology Letters*, 9 (6): 683-693. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00926.x>

Baraloto C., Molto Q., Rabaud S., Hérault B., Valencia R., Blanc L., *et al.*, 2013. Rapid simultaneous estimation of aboveground biomass and tree diversity across neotropical forests: A comparison of field inventory methods. *Biotropica*, 45 (3): 288-298. <https://doi.org/10.1111/btp.12006>

Bedel F., Durrieu de Madron L., Dupuy B., Favrichon V., Maître H.-F., Bar-Hen A., *et al.*, 1998. Dynamique de croissance dans des peuplements exploités et éclaircis de forêt dense africaine. Dispositif de M'Baïki en République Centrafricaine (1982-1995). Montpellier, France, Cirad, Document Forafri, 1, 72 p.

Bray J. R., Curtis J. T., 1957. An ordination of upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27: 325-349. <https://doi.org/10.2307/1942268>

Chave J., Réjou-Méchain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M. S., Delitti W. B. C., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20: 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

Durrieu de Madron L., Forni E., 1997. Aménagement forestier dans l'est du Cameroun. Structure du peuplement et périodicité de l'exploitation. *Bois et Forêts des Tropiques*, 254 (4) : 39-50. [http://agritrop.cirad.fr/389267/1/document\\_389267.pdf](http://agritrop.cirad.fr/389267/1/document_389267.pdf)

Fargeot C., Forni E., Nasi R., 2004. Réflexions sur l'aménagement des forêts de production dans le bassin du Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 281 (3) : 19-34. [https://agritrop.cirad.fr/520702/1/document\\_520702.pdf](https://agritrop.cirad.fr/520702/1/document_520702.pdf)

- Fayolle A., Swaine M. D., Bastin J.-F., Bourland N., Comiskey J. A., Dauby G., *et al.*, 2014. Patterns of tree species composition across tropical African forests. *Journal of Biogeography*, 41: 2320-2331. <https://doi.org/10.1111/jbi.12382>
- Feldpausch T. R., Lloyd J., Lewis S. L., Brien R. J. W., Gloor M., Monteagudo Mendoza A., *et al.*, 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9: 3381-3403. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012>
- Freycon V., 2014. Caractérisation des sols de Loundoungou et de Mokabi (Congo). Rapport de mission DynAffor, 2-24 avril 2014, Cirad/AFD/FFEM, 64 p.
- Gourlet-Fleury S., Beina D., Fayolle A., Ouédraogo D.-Y., Mortier F., Bénédet F., *et al.*, 2013a. Silvicultural disturbance has little impact on tree species diversity in a Central African moist forest. *Forest Ecology and Management*, 304: 322-332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.021>
- Gourlet-Fleury S., Mortier F., Fayolle A., Baya F., Ouédraogo D. Y., Bénédet F., *et al.*, 2013b. Tropical forest recovery from logging: a 24 year silvicultural experiment from Central Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368: 20120302. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0302>
- Gower J. C., 1971. A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, 27 (4): 857-871. <https://www.jstor.org/stable/2528823>
- Legendre P., Legendre L., 2012. *Numerical Ecology*, vol. 24. Elsevier, coll. *Developments in Environmental Modelling* (cf. note 27, p. 86). <https://www.elsevier.com/books/numerical-ecology/legendre/978-0-444-53868-0>
- Mille G., Louppe D., 2015. *Mémento du forestier tropical*. Versailles, France, Éditions Quæ, 1 200 p.
- 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. <http://hal.cirad.fr/cirad-00339816/document>
- R Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Schmitt L., 1982. Mise en place d'un dispositif d'étude de la forêt dense centrafricaine suivant différents types d'intervention. *Projet FAC/ARRF/CTFT*, 49 p.
- Tran-Hoang A., Favrichon V., Maître H.-F., 1991. Dispositifs d'étude de l'évolution de la forêt dense centrafricaine suivant différentes modalités d'intervention sylvicole. Présentation des principaux résultats après huit années d'expérimentation. Nogent-sur-Marne, France, Centre technique forestier tropical.
- Zanne A. E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D. A., Ilic J., Jansen D., Lewis S. L., *et al.*, 2009. Global wood density database. *Dryad*. <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>

### Forni *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	É. Forni, S. Gourlet-Fleury
Gestion des données	F. Bénédet, G. Cornu
Analyse formelle	V. Rossi, S. Gourlet-Fleury, G. Cornu
Acquisition du financement	S. Gourlet-Fleury
Enquête et investigation	I. Zombo, M. Mazengue, V. Freycon
Gestion de projet	S. Gourlet-Fleury, É. Forni
Logiciels	V. Rossi, S. Gourlet-Fleury, G. Cornu
Supervision	J.-F. Gillet, V. Istace, É. Alberny, M. Mayinga
Visualisation	É. Forni, S. Gourlet-Fleury, V. Rossi, V. Freycon
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	É. Forni, S. Gourlet-Fleury, V. Rossi
Écriture – Révision et édition	É. Forni, S. Gourlet-Fleury, V. Rossi

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier  
Cedex 5, France - Contact : [bft@cirad.fr](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X