

CHAPITRE 12

UN APERÇU DES STOCKS DE CARBONE

ET LEURS VARIATIONS DANS LES FORÊTS DU BASSIN DU CONGO

Robert Nasi, Philippe Mayaux, Didier Devers, Nicolas Bayol, Richard Eba'a Atyi, Antoine Mugnier, Bernard Cassagne, Alain Billand, Denis Sonwa

Introduction

Dans la lutte contre les changements climatiques, le Protocole de Kyoto ne permet le boisement et le reboisement qu'à travers le mécanisme pour un développement propre (MDP). Les règles et les modalités établies en vertu des Accords de Marrakech permettent aux pays en développement de vendre des unités de réduction certifiées d'émissions de MDP aux pays développés jusqu'à une limite de 230 millions de tonnes de CO₂ pendant la période 2008-2012 (environ 45 millions de tonnes de CO₂ en moyenne par an). Parallèlement, le Groupe d'Experts intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) estime que 1,7 milliard de tonnes de CO₂ sont rejetées chaque année dans l'atmosphère à cause des changements du couvert terrestre, et en grande partie la déforestation tropicale, ce qui relègue au second plan les retombées possibles d'éventuels projets forestiers de MDP. L'importance des émissions occasionnées par la déforestation, qui n'est pas incluse dans le Protocole de Kyoto, a incité la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les Changements climatiques (CCNUCC) d'enclencher un processus de deux ans qui permette d'étudier les problèmes liés à la réduction des émissions occasionnées par la déforestation dans les pays en développement. Ce processus a atteint son apogée lors de la COP 13 à Bali en décembre 2007 avec la Décision 2/CP.13 « réduction des émissions résultant du déboisement dans les pays en développement : démarches incitatives ». Il est intéressant de noter que la communauté internationale a mis plus de 10 ans pour (i) reconnaître que la réduction des émissions dues à la déforestation ou séquestrer du carbone dans les forêts sur pied est plus efficace que la plantation d'arbres, et (ii) ramener ce sujet dans les négociations internationales sur le climat. La mise en place des règles et des modalités concernant la réduction des émissions résultant du déboisement dans les pays en développement prendra probablement encore cinq ans, mais certains pays et donateurs souhaitent commencer le plus rapidement possible.

Sans entrer dans les innombrables arguments actuels concernant les niveaux de référence ou les

mécanismes financiers à adopter, le concept de la réduction des émissions liées à la déforestation et la dégradation des forêts (REDD) permettrait d'inciter les pays en développement à réduire volontairement leurs taux nationaux de déforestation et les émissions de carbone qui en sont dérivées en dessous des niveaux de référence. Les pays qui démontreraient de telles réductions d'émissions seraient en mesure de vendre des crédits de carbone sur le marché international du carbone, ou de recevoir pour leur bon comportement une compensation financière dont la modalité resterait à définir.

Quel que soit le mécanisme définitif REDD qui sera adopté, il faudra connaître le plus précisément possible la quantité de carbone (C) :

- emmagasinée dans différents types de végétation sur pied (particulièrement les forêts) et les sols ;
- rejetée par d'autres activités de l'AFOLU « *agriculture, forestry, and other land use* », agriculture, foresterie et autres usages du sol.

Ce chapitre a pour but d'apporter les meilleures réponses possibles à ces deux questions sans entrer dans des détails scientifiques complexes, tout en évitant une simplification exagérée. Ce chapitre débute en donnant quelques définitions et explications de termes. Ensuite, afin de pouvoir déterminer les stocks de carbone existants par type de végétation, le contenu de carbone par hectare de chaque type de végétation sera présenté pour chaque région. Afin d'obtenir une appréciation des activités humaines passées et actuelles, des estimations de la déforestation et de la dégradation liées à l'agriculture, la forêt (exploitation forestière) et d'autres occupations des sols seront présentées. L'état des connaissances sur les flux de carbone par le biais de processus écologiques et ce qu'on peut en déduire à juste titre pour les forêts du bassin du Congo sera exposé et finalement le chapitre conclura par une note de prudence concernant les incertitudes des estimations présentées dans ce chapitre.

Définitions³⁷

Les terres forestières comprennent toutes les terres qui comportent une végétation arborescente correspondant aux seuils utilisés pour définir les terres forestières dans les inventaires nationaux officiels de gaz à effet de serre. Elles comprennent également les types de végétation qui, *in situ*, seraient susceptibles d'atteindre les valeurs seuils utilisées par un pays pour définir les terres forestières (comme les peuplements en régénération).

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, les Parties doivent choisir une valeur unique de taux de recouvrement par la canopée, d'hauteur d'arbre et de superficie de peuplement pour définir les forêts au sein de leurs limites nationales. La sélection doit être effectuée à partir des éléments suivants :

- superficie minimum du peuplement : 0,05 à 1 ha, assortie des deux critères suivants :
- potentiel à atteindre *in situ* une hauteur minimum de 2 à 5 m à maturité
- taux de recouvrement minimal par la canopée (ou proportion de surface occupée équivalente) : 10 à 30 %.

À l'heure d'écrire ces lignes (novembre 2008), les seules valeurs minima, nécessaires à la définition de la forêt publiées à l'échelle nationale pour les pays du bassin du Congo sont celles définies par la RDC, à savoir : superficie minimum du peuplement, 1 ha ; hauteur minimum à maturité, 5 m ; taux de recouvrement par la canopée, 30 %. Il faut noter que ces valeurs n'ont été établies que pour satisfaire les besoins du Protocole de Kyoto et du MDP, et qu'elles pourraient être réexaminées dans le cadre d'un futur mécanisme REDD.

La déforestation est une conversion à long terme ou permanente des terres forestières à des fins d'utilisations non forestières. La CCNUCC (décision 11/CP.7) la définit comme : « ... la conversion anthropique directe de terres forestières en terres non forestières ». La déforestation dans un pays donné est donc une réduction du recouvrement de la canopée en-dessous du seuil défini par ce pays (p. ex., pour la RDC la déforestation ne serait pas prise en compte avant que la couverture au sol ne soit réduite au-dessous du seuil de 30 %). Si la couverture forestière descend sous le seuil défini seulement provisoirement, en raison de l'exploitation forestière par exemple, mais qu'il est prévu qu'elle repasse ensuite au-dessus de ce seuil, alors ce cas n'est pas considéré comme de la déforestation. Selon les catégories d'utilisation des terres de l'AFOLU, il y a déforestation quand

« les terres forestières sont converties en terres agricoles, en prairie, en villages, en sols marécageux ou en d'autres occupations du sol ».

La dégradation est définie comme une diminution des stocks de carbone, causée par les activités humaines, dans des forêts qui, selon les trois critères définis ci-dessus, demeurent toujours des forêts. Toutefois, il n'y a pas de définition quantitative acceptée du terme, ce qui peut compliquer sérieusement le suivi de la quantité de carbone émis par les forêts « qui se dégradent » ou la quantité de carbone qui pourrait être piégé si on réduisait ces dégradations. Pour élaborer un système de suivi de la dégradation, il est d'abord nécessaire d'identifier les causes majeures de dégradation (industries extractives, agriculture...) et la répercussion que celles-ci auraient sur les stocks de carbone. De plus, la dégradation par le feu ou par la récolte de bois de chauffage, ou celle causée par des espèces envahissantes, toutes des causes importantes de dégradation, sont susceptibles d'être plus compliquées à suivre à l'aide de la télédétection. Selon l'AFOLU, une diminution des stocks de carbone des « terrains forestiers qui demeurent des terrains forestiers » équivaldra à la dégradation.

Dans le cadre des négociations « climat » et REDD, la déforestation et la dégradation sont uniquement considérées en fonction des stocks de carbone, sans porter d'attention à la biodiversité et d'autres fonctions de la forêt. Les connaissances sur l'écologie forestière (Dupuy, 1998 ; Zobi, 2002 ; Gourlet-Fleury et *al.*, 2004) démontrent qu'une réduction importante de la surface terrière d'un peuplement forestier dense tropical humide (p. ex., de 30 m²/ha à moins de 20 m²/ha) peut amener un changement profond dans la dynamique forestière et mettre indûment en péril sa régénération tant en terme de diversité que de biomasse. Un tel changement de la surface terrière peut survenir avant que le recouvrement minimal par la canopée ne passe sous les 30 %. Cette situation implique que des pratiques d'occupation des sols, qui ne sont pas strictement parlant considérées comme de la déforestation immédiate (laisant 30 % ou plus de recouvrement par la canopée), peuvent causer de la déforestation à court terme. Dans le même ordre d'idées, une intrusion répétée dans un peuplement forestier, combinée avec la coupe sélective d'espèces sciaphiles réduira considérablement la surface terrière de la forêt et peut successivement éliminer des espèces ligneuses tout en conservant un recouvrement par la ca-

³⁷ Les définitions utilisées dans ce chapitre proviennent du GOF-C-GOLD Sourcebook, (GOF-C-GOLD 2008).

nopée au-dessus du seuil de 30 %, résultant ainsi en une forêt dégradée peu propice à une exploitation future.

Les lignes directrices du GIEC font référence à deux données d'entrée de base pour calculer les inventaires de gaz à effet de serre :

- Les « données sur les activités » dans le cas de la déforestation et la dégradation des forêts font référence aux données de changements de superficie (p. ex., la surface d'une terre forestière est convertie en un autre type d'occupation du sol).
- Les « facteurs d'émission » font référence aux émissions/absorptions des gaz à effet de serre par unités de surface (p. ex., tonnes de dioxyde de carbone émis par hectare de déforestation).

Parmi les trois approches possibles (voir tableau ci-dessous) pour représenter le changement de la superficie de différentes occupations du sol, il est probable que seule la troisième approche puisse être utilisée pour l'application de REDD. Cette troisième approche implique un suivi spatialement explicite des changements entre les différentes catégories d'occupation du sol.



© Reto Kuster

Approche pour les données d'activités : changements d'occupation des sols

1. Superficie totale pour chaque catégorie d'affectation des terres, mais aucune information sur les changements (seulement les changements nets)
2. Suivi des changements entre les catégories d'occupation des sols
3. Suivi spatialement explicite des changements d'occupation des sols

Les facteurs d'émissions proviennent des estimations des changements de stocks de carbone. Cette information peut être obtenue à différents niveaux classés en « niveaux » (voir le tableau ci-dessous) indépendamment de l'« approche » sélectionnée. Le niveau 1 utilise la valeur par défaut du GIEC, le niveau 2 nécessite certaines estimations propres à chaque pays (c.-à-d. les inventaires

et les placettes d'échantillonnage permanentes), alors que le niveau 3 nécessite des données telles que l'inventaire des stocks de carbone dans différents réservoirs et l'estimation, par des mesures répétitives ou par modélisation, de quelque changement que ce soit. L'exactitude, la complexité et le coût du suivi augmentent de la catégorie 1 à la catégorie 3.

Niveau de facteurs d'émissions : changement en stocks de carbone

1. Facteurs par défaut du GIEC
2. Les données propres à chaque pays pour les facteurs clés
3. Inventaire national détaillé des stocks de carbone clés, mesures répétées des stocks clés à travers le temps ou modélisation

Photo 12.1 : La disponibilité de la lumière est souvent un facteur limitant pour la croissance des plantules du sous-bois.

Estimation des changements de superficies d'occupation et d'utilisation du sol

Types d'occupation du sol et de végétation

Dans la catégorie « forêt » du GIEC, aux différents types écologiques correspondent différents stocks de carbone. Dans le but de fournir les chiffres les plus précis de stocks de carbone, et de leurs variations, pour l'Afrique centrale, les données GLC2000³⁸ seront utilisées pour décrire de façon détaillée les superficies des principaux types de

forêts et les stocks de carbone qui y sont associés. Pour chaque classe GLC2000, le couvert arboré a été analysé (à partir de données de MODIS) et le domaine floristique a été défini (White, 1983). Les résultats sont résumés dans le tableau 12.1 et sont donnés avec les équivalents « écologiques » de classes d'occupation du sol.

Tableau 12.1 : Classes de couvertures terrestres majeures et types de végétation équivalents dans le bassin du Congo

Classe d'occupation du sol dérivée de l'imagerie satellite à basse résolution (% couvert arboré)	Types de végétation équivalents et écologie	Domaine floristique
Forêts denses humides		
Forêts marécageuses et riveraines (>70 %)	Forêts inondées à feuilles persistantes, marécages d'eau douce caractérisés par Uapaca, Guibourtia, Hallea, Raphia	Gu-Co
Forêts denses sempervirentes, de basse altitude (>70 %)	Forêts sempervirentes et semi-décidues de moins de 900 m d'altitude ; grande diversité floristique	Gu-Co
Forêts denses de moyenne altitude (>70 %)	Forêts de transition entre les forêts de basse altitude et les forêts de montagne (900 et 1.500 m)	AfMo
Forêts montagnardes (>70 % - variable)	Forêts montagnardes sempervirentes (1.500-2.400 m) et végétation alpine (>2.400 m) caractérisées par Alangium, Linoceira, Olea, Prunus	AfMo
Mangroves (10-60 %)	Forêts côtières sempervirentes sur alluvions marines, eaux saumâtres ; diversité d'espèces de petits arbres, dominées par Rhizophora, Avicennia, Brugueria	Azonal
Forêts fermées décidues (>40 %)	Forêts ouvertes, Miombo dense caractérisés par Brachystegia (Zam), Julbernardia (Zam) et Isoberlinia (Zam/Sud)	Zam/Sud
Mosaïque forêt /terres cultivées (20-60 %)	Correspond assez étroitement à des zones de culture itinérantes sur brûlis (ensemble de terres cultivées, jachères, plantations, jeunes forêts secondaires) situées autour des axes de transport et des établissements humains ; la couverture forestière est souvent dominée par des espèces pionnières (Musanga, Macaranga)	Gu-Co
Mosaïque forêt /savane (30-60 %)	Savanes humides et forêts-galeries ; les savanes correspondent aux « savanes dérivées » (sensu Keay 1959) ou savanes guinéennes ; elles constituent des savanes de pyroclimax ; le palmier <i>Borassus aethiopicum</i> est souvent commun ; les forêts sont semblables à la classe de forêts denses sempervirentes.	Gu-Co
Savanes boisées décidues (10-40 %)	Savanes boisées, miombo ouvert caractérisé par une couverture de graminées vivaces et d'une couverture arborée ouverte ; les familles de Combretaceae et des Leguminosae sont très communes	Zam/Sud
Savanes arbustives et herbeuses (<10 %)	Végétation dominée par les herbacées avec de petits arbres éparpillés, comprise dans la masse forestière dense. Les savanes herbeuses correspondent aux régions du plateau Batéké et de l'Adamaoua ; les broussailles se trouvent dans la région Niari-Nyanga-Ngounié (Gabon-Congo) et en RDC	Zam/Sud

Domaines : Gu-Co : guinéo-congolais ; AfMo : afro-montagnard ; Zam : zambézien ; Sud : soudanais.

Source : adapté d'après Mayaux et al., 2004.

³⁸ Une description complète des types d'affectation des terres/occupation du sol est disponible dans Mayaux et al. 2004.

Les deux principales catégories d'utilisation des terres dans la sous-région sont les concessions d'exploitation forestière (595.380 km²) et les zones protégées (444.970 km²). L'agriculture itinérante, qui est la troisième grande catégorie d'utilisation

des terres est difficile à détecter par l'imagerie satellite à basse résolution, mais peut être estimée en première approximation à 438.801 km² (somme de deux classes de occupations du sol du tableau, les terres cultivées (comprise dans « autres ») et les mosaïques forêts /terres cultivées12.)³⁹.

Tableau 12.2 : Estimation de superficie par classes d'occupation du sol et catégorie d'affectation des terres (protection, exploitation forestière) en 2006

Classe d'occupation du sol	Superficie totale (km ²)	% sous-région	Superficie protégée (km ²)	Taux de couvertures des zones protégées (%)	Superficie allouée à l'exploitation forestière (km ²)	Taux de couvertures des zones attribuées à l'exploitation forestière (%)
Forêt dense humide de basse altitude	1.421.834	35	187.880	13	481.680	34
Forêt dense d'altitude moyenne (900-1.500 m)	63.100	2	23.290	37	1.530	2
Forêt de montagne (>1.500 m)	9.754	0,2	7.870	81	20	0
Forêt marécageuse	123.264	3	10.280	8	28.570	23
Mangrove	1.926	0	240	12	20	1
Total des forêts humides	1.619.879	40	229.580	14	511.830	32
Mosaïque forêt/terres cultivées	370.123	9	13.000	4	45.860	12
Mosaïque forêt/savane	588.011	15	49.870	8	16.280	3
Forêt dense sèche (Miombo)	304.808	8	16.220	5	4.720	2
Savane boisée et arborée décidue	630.890	16	64.350	10	1.680	0
savane arbustive et herbeuse, arbres et arbustes épars et décidus	301.220	7	46.070	15	10.780	4
Autres	233.540	6	25.910	11	4.220	2
Total dans la sous-région (bassin du Congo)	4.048.470	100	444.970	11	595.380	15

Sources : GLC 2000, FORAF

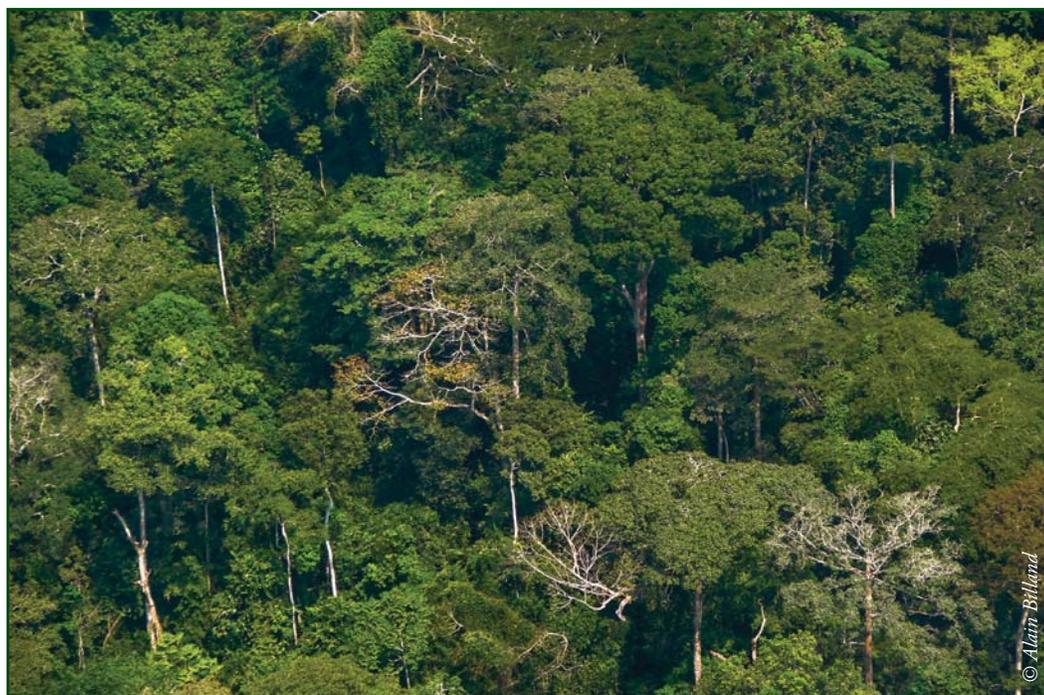


Photo 12.2 : La canopée présente souvent une structure complexe d'espèces variées.

³⁹ Ce chiffre est probablement une sous-estimation car quelques terres cultivées se trouvant à l'intérieur d'exploitations forestières ou de zones protégées n'ont pas été inclus dans ce nombre.

Changements entre 1990 et 2005

Alors que le calcul des superficies forestières provient de l'analyse d'images satellites à basse résolution, mais à haute fréquence d'observation, les changements de superficie sont mieux mesurés par l'analyse d'images satellites à haute résolution spatiale prises à deux dates distinctes. Deux

études récentes (Duveiller *et al.*, 2008 ; Hansen *et al.*, 2008a), bien que basées sur des méthodes différentes, ont produit des estimations fiables et cohérentes de taux de déforestation sur la forêt dense humide d'Afrique centrale entre 1990 et 2005.

Tableau 12.3⁴⁰ : Taux annuels de déforestation (forêts humides) et de dégradation entre 1990 et 2000 pour l'ensemble de la région du bassin du Congo et pour chaque pays

Pays	Déforestation nette annuelle (%)	Dégradation nette annuelle (%)
Cameroun	0,14	0,02
Gabon	0,09	0,07
Congo	0,02	0,01
RCA	0,06	0,02
RDC	0,20	0,12
Afrique centrale	0,16	0,09

Source : chiffres adaptés à partir des travaux de Duveiller *et al.*, 2008 et Hansen *et al.*, 2008a.

Pour la période de 1990-2000, le taux annuel brut de déforestation des forêts tropicales d'Afrique centrale est évalué à 0,16 % par an, et un taux net de dégradation estimé à 0,09 %. Le taux net de déforestation pour ces 10 années est donc de 1,6 %, ce qui signifie que les forêts humides du bassin du Congo ont perdu environ 29.000 km² de superficie pendant cette période. Des estimations nationales sont aussi fournies dans le tableau 12.3, avec cependant des chiffres moins fiables pour le Cameroun et le Gabon étant donné le peu de données satellites disponibles pour ces deux pays en raison de la nébulosité quasi permanente qui y existe.

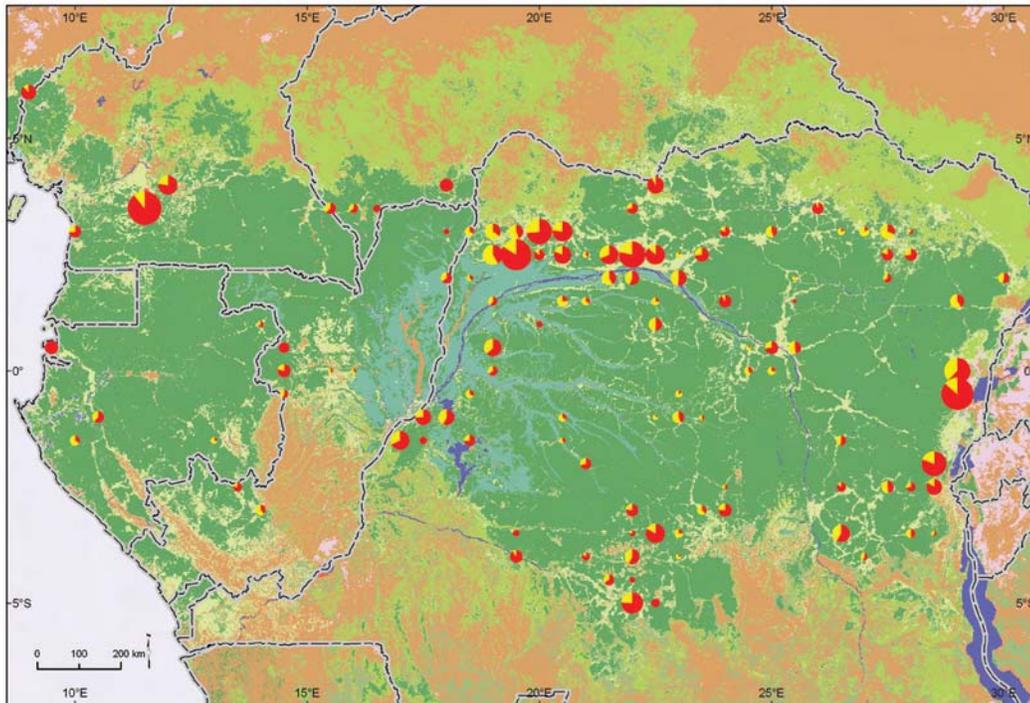
Les premières estimations des changements de couvert forestier entre 2000 et 2005 proviennent d'un ensemble de données satellites multi-temporelles et multi-résolutions (Hansen *et al.*, 2008b). Les auteurs rapportent un taux de perte forestière de 0,76 % pour cette période (0,15 %/an), ce qui est très proche des 0,16 %/an rapporté pour la période 1990-2000 et qui représente une superficie d'environ 14.000 km².

En résumé, de 1990 à 2005, environ 43.000 km² de forêts humides ont été déboisées dans le bassin du Congo.

Ces changements de couverture forestière sont de loin les plus bas de la ceinture tropicale, avec un taux net de déforestation deux fois supérieur en Amérique du Sud et quatre fois supérieur en Asie du Sud-Est. Il est important de noter que la déforestation n'est pas un processus uniforme.

Certaines zones (figure 12.1) subissent une plus forte déforestation que d'autres en raison de l'empiètement des activités agricoles, en particulier dans les régions touchées par les conflits (p. ex., Kivu) et dans les régions aux périphéries du bassin (nord de l'Équateur, Kasai).

⁴⁰ Trois classes d'occupation du sol sont prises en considération dans l'étude de Duveiller *et al.* : forêt dense, forêt dégradée et non-forêt. La classe « forêt dégradée » correspond à une forêt dense entrecoupée de clairières ou de champs cultivés de moyenne taille (2-5 ha), tandis que la classe des mosaïques forêts/terres cultivées de GLC2000 appartient à la classe non-forêt de Duveiller *et al.* La dégradation produite par la coupe sélective n'est pas détectable par l'imagerie satellite à 30 m résolution spatiale qui est utilisée actuellement pour les études régionales de changement du couvert forestier. Les chiffres de la dégradation fournis ne tiennent pas compte de cet état de fait.



Chaque cercle représente un échantillon de 10 x 10 km. La taille est proportionnelle à la superficie totale touchée par la déforestation et la dégradation, alors que le bilan entre les couleurs informe sur l'importance relative des deux processus. Source : Duveiller et al., 2008.

Figure 12.1 : Distribution spatiale de la déforestation (rouge) et de la dégradation forestière (jaune) dans les forêts humides du bassin du Congo.

Estimation des stocks de carbone

L'estimation du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers requiert des estimations pour les réservoirs de carbone suivants :

Au-dessus du sol (AG) : arbres, lianes, végétation du sous-bois, litière et bois mort ;

En-dessous du sol (BG) : carbone contenu dans les racines et le sol.

Le carbone stocké dans les plantes ligneuses (C_w) est lié à la biomasse (B_w) exprimée en matière sèche par unité de superficie (en t/ha) et peut être estimé par la relation : $C_w = k \cdot B_w$ avec $k \approx 0,47$. Ceci revient à dire qu'estimer le stock de carbone ou la biomasse est, équivalent.

Réservoirs de carbone au-dessus du sol

Pour estimer la biomasse épigée (ou aérienne) (AGB) d'un peuplement forestier donné, une équation de biomasse doit d'abord être établie (la relation allométrique entre la biomasse de la végétation – y compris les racines ou non - et certains paramètres faciles à mesurer comme le diamètre à hauteur de poitrine ou la hauteur totale de la végétation). Une telle allométrie est construite à partir de méthodes destructives : une superficie, ou un échantillon d'individus, est mesuré et ensuite coupé à blanc ; toutes les parties (souches, tiges, branches, feuilles, rondins...) sont séchées au four et pesées ; les résultats de ce processus sont alors utilisés pour créer une équation modèle de biomasse : $AGB = f(\text{diamètre, hauteur, densité du}$

bois) pour un arbre donné du peuplement étudié. Cette méthode s'avère la plus précise si l'échantillon est adéquat, mais elle est très coûteuse en temps et en main-d'œuvre. Il importe de noter que l'allométrie ainsi construite n'est seulement valable que pour l'endroit où elle a été établie et pour une gamme donnée de diamètre ou de hauteur. La seule équation locale de biomasse épigée (AGB) pour le bassin du Congo semble être celle élaborée par Ibrahima et al. (2002) pour une forêt sempervirente. Ils ont produit une équation basée sur 93 arbres avec des diamètres à hauteur de poitrine (dbh) allant de 1 à 79 cm, mais avec seulement un arbre sur les 93 ayant plus de 50 cm de diamètre.

Des modèles globaux d'estimation de biomasse basés sur de larges échantillons englobant plusieurs régions tropicales ont également été élaborés (Brown et al., 1989 ; Brown 1997 ; Chave et al., 2005). Pour le moment, les meilleurs modèles globaux disponibles (Chave et al., 2005) sont basés sur 27 sites et 2.410 arbres (aucuns ne provenant de forêts africaines) et utilisent le diamètre et la densité spécifique du bois (\square) :

- pluviosité annuelle de 1.500-3.500 mm, 1-4 mois de saison sèche :
- pluviosité annuelle > 3.500 mm, aucun cycle saisonnier :

$$AGB_{trees} = 0.05378909 D^{2.828851}$$

$$AGB_{trees} \text{ in kg}; D \text{ in cm}$$

Les autres réservoirs de carbone aériens ont en règle générale reçu moins d'attention parce qu'il est admis que dans les forêts tropicales, d'une façon générale, les arbres de plus de 10 cm de diamètre représentent plus de 75 % de la biomasse.

Les équations de biomasse disponibles sont ensuite appliquées aux données de recensement des peuplements (à partir de placettes d'échantillonnage permanentes ou en utilisant des données d'inventaires forestiers) pour estimer la biomasse d'un type de peuplement ou d'un type forêt. Un examen de la littérature scientifique existante sur des estimations de biomasse basées

sur des placeaux et utilisant des équations et/ou des mesures destructrices est fourni en annexe 1. L'annexe 2 fournit quant à elle des estimations de biomasse basées sur des données d'inventaire. Certains auteurs (annexe 3) utilisent des techniques de modélisation SIG, en utilisant des hypothèses raisonnables, mais en grande partie non vérifiées, pour extrapoler les valeurs de biomasse de peuplements pour des régions entières, ou des biomes entiers et pour créer des cartes de biomasse. Les plus récentes études à l'échelle des biomes estiment les stocks de carbone pour la totalité de l'Afrique subsaharienne (Gibbs et Brown, 2007) tenant compte des perturbations anthropiques et utilisant une analyse SIG basée sur des règles permettant d'extrapoler spatialement l'étendue des forêts à partir de données d'inventaire.

À partir d'une revue d'ensemble de la littérature scientifique et assumant une valeur de 0,47 comme facteur de conversion « biomasse-carbone », les meilleures données disponibles, provenant de placeaux, d'inventaire et d'approches SIG (annexes 7, 8 et 9), ont été utilisées afin d'obtenir les estimations suivantes de stock de carbone, par classes d'occupation du sol (tableau 12.4).



Photo 12.3 : Les mesures et inventaires forestiers sont essentiels pour la quantification du carbone forestier.

Tableau 12.4⁴¹ : Carbone aérien (t/ha) dans la végétation par types d'occupation du sol

Types d'occupation du sol	Carbone aérien		
	Basé sur des données de placeaux (annexe 7)	Basé sur des données d'inventaire (annexe 8)	Basé sur des données SIG (annexe 9)
Savane boisée décidue	21 (2-43 ; 20)	-	-
Forêt dense sèche (Miombo)	42 (22-68 ; 6)	-	36
Forêt dense humide de basse altitude	216 (146-275 ; 15)	126 (63-174 ; 55)	178 – 211
Forêt marécageuse	-	85 (- ; 1)	-
Forêt dense de moyenne altitude	-	-	68
Forêt (humide)de montage	-	-	68
Mosaïque forêt– terre cultivée (complexe rural)	54 (3-141 ; 29)	-	-
Mosaïque Forêt– savane	14 (4-22 ; 2)	-	-

Valeurs dans le tableau : moyenne (ensemble ; nombre d'observations).

Source : Voir annexes 7, 8 et 9.

Dans le cas des estimations basées sur des données d'inventaire, une observation est un groupe d'inventaires de placettes situées dans une même strate forestière. Le nombre total d'inventaires de placettes est plus élevé que les chiffres donnés.

Pour les forêts denses humides de basse altitude, les chiffres basés sur des données d'inventaire sont légèrement plus faibles que les estimations de la FAO (2006), cette dernière donne une moyenne de 155 tC/ha (à partir de 30-35 cm dbh, en fonction des pays). Ces différences peuvent s'expliquer comme suit :

- Une représentativité différente d'échantillons à l'échelle sous-régionale : par exemple, les forêts

ouvertes de la RDC et du nord du Congo sont surreprésentées dans les estimations basées sur des données d'inventaire ;

- Des incertitudes liées à certaines hypothèses utilisées pour faire les calculs ;
- Les valeurs en gras indiquent les valeurs qui ont été choisies pour ce document. Bien que les stocks de carbone estimés à partir des données d'inventaire semblent inférieurs aux estimations provenant de placettes ou d'études SIG, ceux-ci représentent probablement une meilleure estimation de la réalité car ils sont basés sur des échantillons beaucoup plus larges).

⁴¹ Tous les chiffres listés dans ce tableau doivent être pris avec réserve. Les sources potentielles d'erreurs sont listées dans la section « Mise en garde : données, erreurs, incertitudes » à la fin de ce chapitre.

Réservoirs de carbone sous-terrain

La biomasse hypogée (BGB) est constituée des racines. Ce réservoir de carbone est considéré comme étant le plus difficile à évaluer et les rares données disponibles pour l'Afrique centrale (voir annexe 7) doivent être utilisées avec circonspection car elles proviennent d'échantillons limités en nombre et en taille. De ce fait, l'utilisation du ratio racine/tige (R/S) est devenu une méthode de base pour estimer la biomasse sous-terrain à partir de la biomasse aérienne plus facilement mesurable : $BGB = AGB * R/S$

Mokany *et al.* (2006) fait une revue détaillée de la littérature scientifique sur les ratios racine/tige et sur les valeurs R/S dérivées pour divers types de végétation (tableau 12.5) recommandés par le GIEC (2006). Aucune donnée n'est disponible pour l'Afrique et tous les échantillons utilisés dans ce tableau ont été mesurés dans d'autres régions.



Photo 12.4 : Le transport de grumes peut être localement perturbé par la qualité du réseau routier.

Tableau 12.5 : Valeurs du rapport racine/tige

Type de végétation	Biomasse aérienne (t/ha)	Valeur R/S médiane	Min	Max	Taille de l'échantillon
Forêt tropicale humide	<125	0,205	0,092	0,253	4
	>125	0,235	0,220	0,327	10
Forêt tropicale sèche	<20	0,563	0,281	0,684	4
	>20	0,275	0,271	0,278	2
Savane boisée tropicale humide		0,420	0,292	0,548	7
Savane boisée tropicale sèche		0,322	0,259	0,710	6
Savane herbeuse		1,887	0,380	4,917	15

Adapté d'après Mokany et al., 2006.

Pour une forêt tropicale « moyenne » (comportant en règle générale une biomasse aérienne de plus de 125 t/ha), on estime que les racines représentent 23,5 % de la biomasse aérienne. Toutefois, cette valeur augmente dans les écosystèmes plus arides et les racines représentent 42 % de la biomasse aérienne des savanes tropicales boisées et arbustives. Il est important de noter que ces valeurs proviennent d'un nombre très limité d'échantillons (p. ex., 14 pour les forêts tropicales humides ou 6 pour les forêts tropicales sèches) et qu'elles doivent, par conséquent, être traitées et utilisées avec précaution.

Un autre réservoir de carbone sous-terrain se trouve dans le sol lui-même. Le réservoir de carbone organique dans le sol (COS) joue un rôle important dans l'écologie des écosystèmes terrestres par la modulation de la capacité d'échange cationique (CEC)⁴², la capacité de rétention en eau, la structure du sol, la résistance à l'érosion, etc. L'évaluation du COS et sa dynamique est le

sujet de nombreuses études. Lal (2005) considère que si tous les autres paramètres de sol sont égaux, le COS est semblable dans les sols tropicaux et tempérés, mais que le COS tropical est sujet à des taux plus rapides de décomposition. Certaines estimations locales de COS (voir annexe 10) existent pour l'Afrique centrale⁴³, ou pour des écosystèmes semblables en Afrique occidentale, mais sont sujettes aux mêmes réserves d'utilisation que pour les estimations de carbone contenu dans les racines. En se basant sur l'annexe 9 et sur des données supplémentaires trouvées dans la littérature scientifique, les valeurs suivantes de COS (tC/ha) peuvent être déclinées. Tel que l'indique le tableau 12.6, il semble ne pas y avoir de différences significatives de COS entre les divers types d'occupation du sol, ce qui signifie que nous pouvons utiliser la moyenne pondérée globale (38 tC/ha) comme approximation de valeur de COS pour la sous-région.

Tableau 12.6 : Carbone organique dans le sol (COS) en tonnes /ha

Types d'occupation du sol	Moy	StD	Médiane	Min	Max	n	Sources
Miombo sec en jachère	45	14	45	20	74	28	Williams et al., 2008
Chromolaena en jachère	39	14	37	21	58	6	Palm et al., 2000
Agroforesterie (cacao)	42	8	41	33	53	6	Palm et al., 2000 ; Sonwa 2004
Culture en forêt humide	35	15	38	18	56	5	Palm et al., 2000
Forêt	52	14	49	37	75	7	Palm et al., 2000 ; Jaffré et al., 1983
Forêt humide en jachère	53	20	47	30	89	18	Palm et al., 2000 ; Jaffré et al., 1983
Miombo humide	83	23	SO	SO	SO	5	Walker & Desanker, 2004
Miombo humide en jachère	52	17	SO	SO	SO	6	Walker & Desanker, 2004
Culture en miombo humide	49	11	SO	SO	SO	11	Walker & Desanker, 2004
Miombo sec	SO	SO	58	18	140	28	Williams et al., 2008
Moyenne pondérée globale	38			18	140	120	

Moy : moyenne ; StD : déviation standard ; n : nombre d'observations.

⁴² Dans la science du sol, la capacité d'échange cationique est utilisée comme mesure de fertilité, de capacité de rétention des nutriments et de capacité de protéger l'eau souterraine de la contamination cationique. (Wikipedia).

⁴³ Un nouveau développement intéressant est l'utilisation de SOTER (Batjes 2008) pour la cartographie des stocks de carbone dans le sol au Burundi, au Rwanda et en République démocratique du Congo.

Une estimation du carbone stocké dans les écosystèmes du bassin du Congo

Basé sur les données mentionnées ci-dessus de types d'occupation du sol et de stocks de carbone, on arrive à une estimation de 46 milliards de tonnes pour le carbone stocké dans le bassin du

Congo (tableau 12.7a). Les forêts denses humides de basse altitude représentent 60 % du carbone stocké dans la sous-région, pour seulement 35 % de la superficie.

Tableau 12.7a : Estimation totale du stock de carbone dans le bassin du Congo

Types d'occupation du sol (LC)	Superficie (km ²)	Réservoirs de carbone (t/ha)				Total C (millions tonnes)
		AG C	R/S	COS	C	
1. Forêt dense humide de basse altitude	1.421.834	125	0,235	38	192	27.299
2. Forêt marécageuse	123.264	85	0,235	38	143	1.761
3. Forêt dense d'altitude moyenne (900-1.500 m)	63.100	68	0,235	38	122	770
4. Forêt de montagne (>1.500 m)	9.754	68	0,235	38	122	119
Forêts denses humides (1-4)	1.617.952	147			185	29.949
Forêt dense décidue (Miombo)	304.808	42	0,275	38	92	2.791
Mosaïque forêt/terres cultivées	370.123	54	0,275	38	107	3.955
Mosaïque forêt/savane	588.011	14	0,42	38	58	3.403
Savanes boisées et arbustives décidues	630.890	21	0,322	38	66	4.149
Savanes herbeuses, broussailles, arbres épars	392.414	5	0,42	38	45	1.770
Sous-régions du bassin du Congo	4.048.470					46.016

AG C : carbone aérien ; COS : carbone organique dans le sol ; R/S : ratio racine/tige.

Le tableau 12.7b donne l'estimation du stock de carbone par pays et compare les estimations de ce document avec d'autres valeurs publiées dans la littérature scientifique.

Tableau 12.7b : Estimations par pays du stock de carbone total (millions tonnes) dans le bassin du Congo

	Cameroun	Congo	Gabon	Guinée Eq.	RCA	RDC
1. Forêt dense humide de basse altitude	3.162	2.762	4.029	379	886	16.082
2. Forêts marécageuses	0	501	2	0	0	1.000
3. Forêt dense d'altitude moyenne (900-1.500 m)	39	0	2	4	0	857
4. Forêt de montagne (>1.500 m)	2	0	0	0	0	117
Forêts humides totales (1-4)	3.203	3.263	4.033	383	886	18.056
Mosaïque forêt/terres cultivées	414	534	287	57	167	1.945
Mosaïque forêt /savanes	628	145	20	3	2.437	3.059
Forêt dense décidue	6	73	10	0	54	1.625
Savane boisée décidue	684	6	2	1	1.658	1.812
Savane ouverte, broussaille décidue, arbres épars	108	199	31	0	258	760
Total par pays (ce chapitre)	5.043	4.219	4.383	445	5.460	27.258
Total par pays (Gaston et al., 1998)	3.131	2.822	3.892	349	3.740	16.316
Total par pays (Gibbs et al., 2007)	3.454-6.138	3.458-5.472	3.063-4.742	268-474	3.176-7.405	20.416-36.672

Émissions de carbone liées à la déforestation et à la dégradation

Une première estimation au niveau du bassin

En se basant sur l'estimation de la déforestation entre 1990 et 2005 (environ 43.000 km²) et sur la moyenne de stock de carbone des forêts denses humides dérivée du tableau 12.7a (147 tC/ha si on ne considère pas le COS), on peut esti-

mer que la région a rejeté environ 0,63 milliard de tonnes de carbone en 15 ans.

Cette estimation est bien sûr approximative et ne tient pas compte du cycle de vie exact du carbone dans les forêts

Certains exemples spécifiques d'AFOLU

Quelque soit le mécanisme REDD qui sera adopté, il faudra être en mesure d'évaluer les changements de carbone liés aux classes spécifiques d'AFOLU. C'est actuellement peu possible dans le bassin du Congo en grande partie en raison du manque d'études exhaustives des impacts de la conversion des sols sur les réservoirs de carbone. Cependant, certaines études préliminaires existent et permettent de donner une idée de l'importance relative des principaux cas potentiels. À l'aide de données publiées (Jaffré et al., 1983 ; Palm et al., 2000 ; Ibrahim et al., 2002 ; Kanmegne 2004 ; Brown et al., n.d.) ou non (Gourlet-Fleury), il a été possible de représenter les variations de carbone du réservoir de la biomasse épigée pour cinq systèmes d'occupation du sol :

LOG_EXT : Coupe sélective ou d'écrémage (une espèce, *Entandrophragma cylindricum*, constitue 95 % des arbres exploités) dans une forêt semi-décidue tropicale humide gérée de façon à assurer une rotation sur 30 ans.

LOG_INT : Coupe sélective intensive dans une placette d'échantillonnage permanente à grande échelle, même type de forêt que dans LOG_EXT, mais avec une exploitation forestière plus intense.

SECSUC : Succession secondaire d'une zone éclaircie par brûlis pour planter du riz sec, abandonnée et devenue une forêt secondaire de 40 ans (sud de la Côte d'Ivoire).

OILPAL : Plantation de palmier à huile (130 plantes/ha), replantées tous les 20 ans.

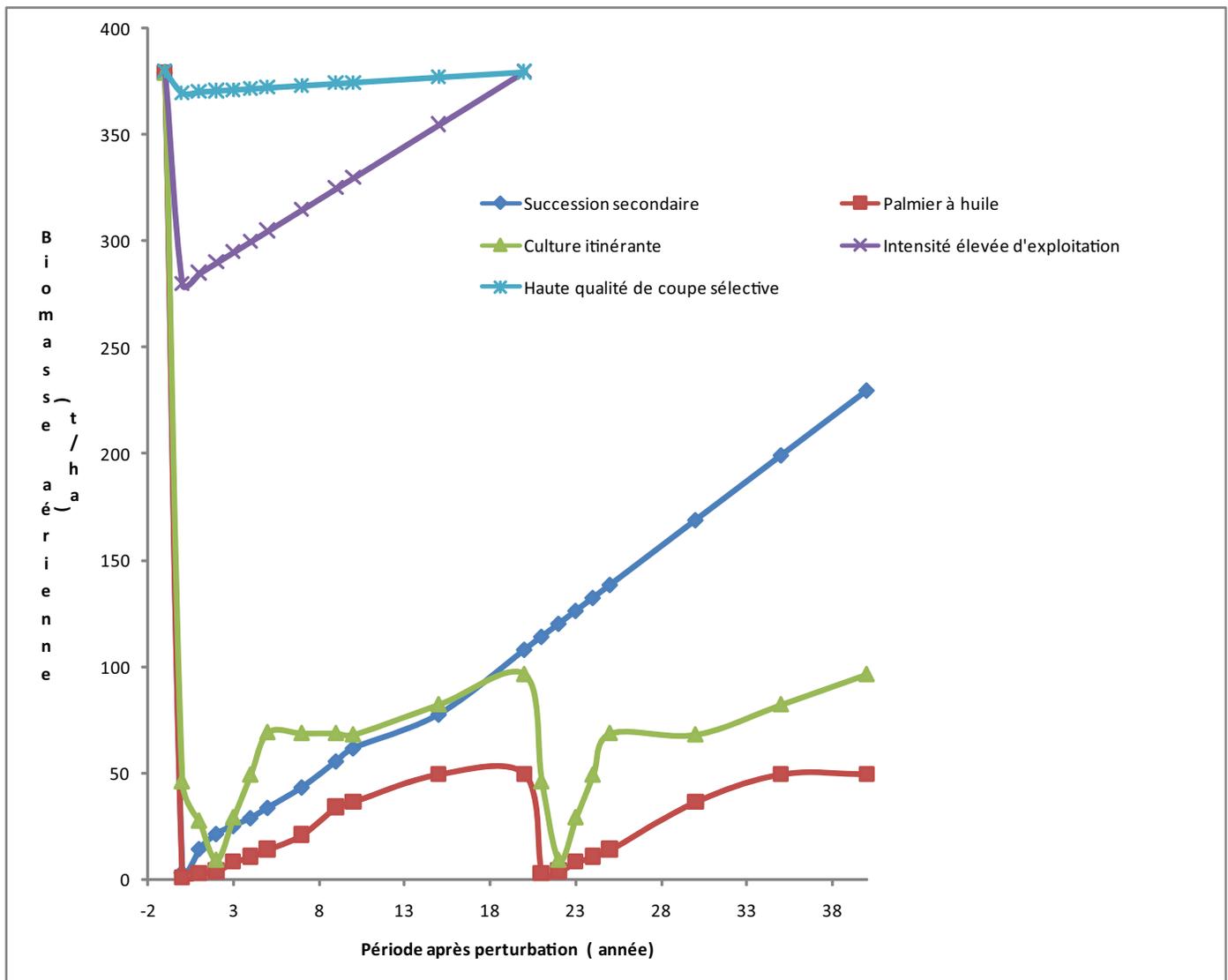
SHICUL : Cycle complet de 20 ans d'agriculture itinérante dans le sud du Cameroun (culture sur brûlis ; *Cucumeropsis melo* –banane plantain ; uniquement banane plantain ; *Chromolaena odorata* en courte jachère ; champs de culture mixte, arachide – manioc ; longue jachère ; culture sur brûlis).

La figure 12.2 illustre clairement que, sauf pour la coupe sélective et la succession secondaire après 20 ans, l'ensemble de la biomasse aérienne demeure après perturbation en dessous de 100 t/ha. Cette figure ne tient pas compte des réservoirs de carbone de bois mort et de litière, mais ceux-ci sont petits (sauf pour les champs de *Cucumeropsis melo* où beaucoup de grumes non brûlées restent sur le sol). Les plantations de palmiers à huile et l'agriculture itinérante, à moins que ces terres ne soient abandonnées et puissent retourner à l'état de forêt, représentent une perte d'environ 70-90 % du stock de carbone forestier initial.

Afin de mieux comprendre le temps requis pour que ces systèmes d'occupation du sol, une fois abandonnés, puissent récupérer leurs stocks de carbone initiaux, des données recueillies par l'initiative d'alternative à la culture sur brûlis (ASB) au Cameroun (Palm et al., 2000a) ont été utilisées sur lesquelles a été ajusté ($r^2 = 0.95$) une courbe sigmoïde de croissance Gompertz (en forme de S) (figure 12.3). Les résultats montrent que la biomasse épigée initiale pourrait être récupérée moins de 50 ans après l'abandon des activités. Les deux exemples d'exploitation forestière montrent qu'il y aurait une récupération complète de la biomasse en 20 ans environ. Cependant, cela ne signifie pas que le stock de carbone se sera reconstitué au même niveau puisqu'une partie de la croissance pourrait être du fait d'essences héliophiles à croissance rapide et à densité spécifique faible ou du fait d'essence sciaphiles de plus petite taille. Cela n'implique pas non plus que la forêt aura complètement récupéré ses qualités initiales après 30 ans, puisque sa composition, sa structure ou son fonctionnement seront toujours en phase de récupération après une telle période de temps. De plus, ces deux exemples ne tiennent pas compte du fait qu'à certains endroits la forêt est détruite complètement et durablement pendant la première opération de l'exploitation fores-



Photo 12.5 : Lot de bois débités prêt à être exporté.



Sources : Jaffré et al., 1983, Palm et al., 2000, Ibrahima et al., 2002, Kannegne 2004, Brown et al., n.d., Gourlet-Fleury données non publiées.

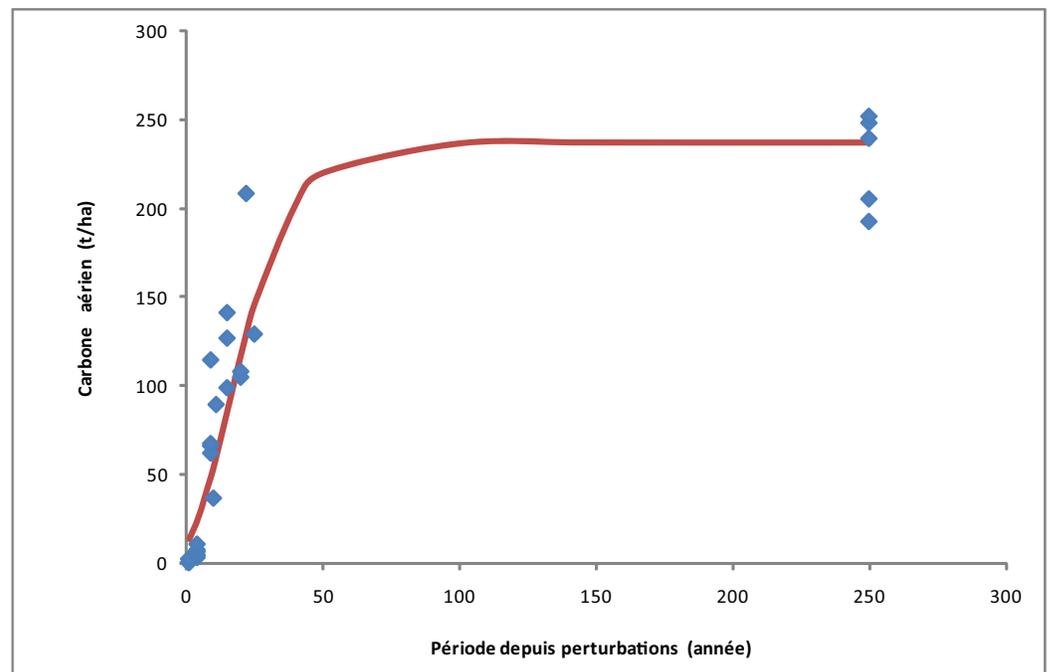
Figure 12.2 : Évolution dans le temps de la biomasse épigée de différents systèmes d'occupation du sol

tière (p. ex., pour les routes permanentes ou les infrastructures de campements).

Ces exemples montrent l'importance des variations de réservoirs de carbone auxquelles on peut s'attendre pour les systèmes d'occupation des sols les plus souvent rencontrés dans le bassin du Congo. L'agriculture, traditionnelle ou moderne, semble être une source d'émission potentielle de carbone beaucoup plus élevée que l'exploitation forestière par coupe sélective qui est pratiquée dans la région.

Ces ensembles limités de données ne sont pas seulement les seuls disponibles pour la sous-région, mais ils ne sont pas non plus les plus pertinents car ils ne portent pas sur les zones principales où les flux de carbone sont susceptibles de

se produire (notamment aux marges du massif forestier). Si les représentants de la région décident de s'engager sérieusement dans le processus REDD, alors il y a un besoin urgent d'effectuer plus d'études de ce genre pour permettre l'utilisation des catégories et approches du GIEC pour la comptabilisation du stock de carbone. Sans ces études supplémentaires, on ne sera pas en mesure de savoir si les émissions sont vraiment réduites grâce à la diminution de la déforestation et de la dégradation ou si seulement de l'« air chaud » est généré.



Source : Palm et al., 2000a.

Figure 12.3 : Courbe d'accumulation de carbone (du déboisement par culture sur brûlis à une forêt intacte)

Mise en garde : données, erreurs et incertitudes

Maintenant que l'importance des forêts du bassin du Congo (et d'autres forêts tropicales) dans le cycle global du carbone, et leur potentiel unique pour réduire une partie du CO₂ rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines, a été démontrée, une mise en garde s'impose en ce qui

concerne les erreurs et incertitudes des données car il y a encore un immense travail à effectuer pour pouvoir évaluer avec précision le carbone stocké, séquestré et rejeté chaque année par les forêts du bassin du Congo.

Estimations de la biomasse basées sur des études de terrain

La plupart des estimations de stocks de carbone dans la végétation vivante sont, soit calculées sur une superficie trop petite de placettes permanentes d'échantillonnage (probablement moins de 300 ha pour la région en entier), soit calculées à l'aide d'équations allométriques dérivées d'un échantillon encore plus petit d'études destructives de la biomasse, suivies par une extrapolation profitant d'inventaires forestiers plus complets mais qui n'ont pas été conçus pour évaluer la biomasse mais bien le volume commercial. Enfin les stocks et les échanges dans le sol tant au niveau des racines que de la biologie du sol sont encore moins bien connus.

Les incertitudes provenant d'une équation de biomasse construite à partir de l'échantillonnage destructeur d'arbres et d'autres composantes végétales sont les suivantes :

- Les erreurs faites dans les mesures des paramètres des arbres (diamètre, hauteur, densité spécifique) nécessaires à la construction du modèle ;
- L'incertitude d'échantillonnage, liée au nombre et à la gamme des diamètres de des arbres mesurés ;
- L'erreur liée à la construction de l'allométrie ;

Pour établir un modèle allométrique qui permette de prédire la biomasse d'un arbre à partir d'autres paramètres facilement mesurables, comme le diamètre ou la hauteur, chaque espèce ou groupe d'espèces devrait avoir sa propre équation, basée sur l'étude destructive d'un large échantillon. Ceci est encore largement irréaliste pour le moment pour les forêts tropicales. Les modèles allométriques qui existent pour les arbres tropicaux ont été établis à partir d'échantillons limités, provenant souvent d'une seule forêt, sont appliqués au-delà de leur gamme de diamètres valides,

et comprennent rarement la densité spécifique du bois. Il faut finalement ajouter qu'aucun des modèles existants, même les plus récents, n'utilisent des données provenant des forêts tropicales d'Afrique.

Les incertitudes dans la dérivation des estimations de la biomasse en utilisant un ensemble de placettes permanentes d'échantillonnage sont les suivantes :

- L'erreur dans l'estimation de la biomasse épiquée d'arbres individuels due à des erreurs de mesurage et de construction de l'allométrie ;
- L'erreur attribuable au choix du modèle allométrique pour dériver la biomasse à partir d'autres paramètres ;
- L'incertitude d'échantillonnage, liée à la taille de la (des) parcelle (s) ;
- La représentativité de la (des) parcelle(s) à l'échelle du paysage.

Les incertitudes dans la dérivation des estimations de la biomasse à partir d'inventaires forestiers classiques sont les mêmes que celles provenant des estimations de la biomasse à partir des placettes permanentes d'échantillonnage, avec en plus :

- L'incertitude d'échantillonnage liée au plan d'inventaire (intensité d'échantillonnage, taille des parcelles, stratification a priori/a posteriori ...)
- L'erreur liée à la limite du diamètre minimum de l'inventaire (30 ou 40 cm dbh dans les inventaires passés, 10-20 cm dbh pour les inventaires plus récents) ;
- Les erreurs liées à l'utilisation de facteurs d'expansion pour convertir les volumes mesurés au-dessus du diamètre minimum (p. ex. 30 cm) à des volumes au-dessus de 10 cm dbh, et pour convertir le volume du peuplement en biomasse.

Il est encore plus compliqué d'estimer la propagation de ces erreurs à partir d'une des étapes du processus d'évaluation de la biomasse à une autre, et ce, jusqu'au résultat final. Une chose est certaine, ce n'est pas une relation simple, et il y a de grandes chances que la plupart de ces erreurs soient additives ou multiplicatives et que, bien que certaines de ces erreurs puissent s'annuler sans créer de tendances, l'intervalle de confiance de toute estimation de biomasse soit susceptible d'être très large. L'objectif du présent chapitre n'est pas de fournir un compte rendu détaillé de ces erreurs et incertitudes mais le tableau 12.8, basé sur la littérature existante permet de donner une idée de l'échelle relative des erreurs possibles.



Photo 12.6 : La progression en forêt est simplifiée par la création de sentiers permanents.



Photo 12.7 : La scie mobile « Mighty Might » permet de débiter les grumes sur site (Gabon).

© Robert Nasi

© Olivier Bonneau

Tableau 12.8 : Quelques tendances, erreurs et incertitudes potentielles dans l'estimation de la biomasse

	Source d'erreur/d'incertitude	Erreur (de la moyenne, en %)	Paramètre
Établir une équation de biomasse	arbres de forme irrégulière et creux		
	si dbh > 50 cm	+30	BA peuplement
	si dbh < 50 cm	+11	BA peuplement
	mesure des arbres (dbh, H, densité)		AGB arbre
	si dbh > 10 cm	±17	AGB arbre
	si dbh < 10 cm	±23	AGB peuplement
	erreur d'échantillonnage (5, 100, 300 arbres)	±10, 5, 3	AGB arbre
	erreur d'allométrie		AGB arbre
Estimer la biomasse en utilisant un ensemble de placettes d'échantillonnage permanentes	estimation du niveau de l'arbre AGB		
	si dbh > 10 cm	±47	AGB PEP
	si dbh < 10 cm	±78	AGB PEP
	modèle allométrique (sans/ avec corrections)	±22 à 11	AGB PEP
	taille PEP (0,1 ; 0,25 ; 1 ha)	±16, 10, 5	AGB PEP
	représentativité du paysage de l'ensemble de PEP	±11	AGB paysage
Estimer la biomasse en utilisant l'inventaire forestier existant d'un plan de gestion	limites minimums de diamètre pour le recensement	-30	
	30 cm	-55	VOB UFA
	45 cm		VOB UFA

PEP : placettes d'échantillonnage permanentes, BA : surface terrière, AGB : biomasse aérienne, VOB : volume sur écorce, UFA : unité forestière d'aménagement.
Source : Adapté d'après Chave et al., 2004, Feldpausch et al., 2006, Nogueira et al., 2006.

D'après le tableau ci-dessus, les valeurs ou échantillons minimums adéquats semblent être :

- 100 – 150 arbres couvrant un large éventail de diamètres pour établir une équation de la biomasse ;
- parcelles individuelles d'une superficie d'au moins 0,25 ha pour les estimations des paramètres dendrométriques ;
- diamètre de recensements de 10 cm au minimum.

Estimations de la biomasse et des superficies de forêts à partir de la télédétection

L'utilisation de données satellites a sans aucun doute amélioré l'exactitude des cartes forestières et des estimations de changements de couvert forestier. Cependant, il demeure encore certaines incertitudes dans les jeux de données actuelles ce qui a une incidence sur l'exactitude générale des stocks de carbone et des flux. Les incertitudes à estimer les superficies forestières à partir de cartes générées par la télédétection sont :

- Les erreurs en raison du faible pouvoir de résolution spatiale (1 km) des cartes de couverture forestière ;
- Les approximations dans les légendes qui sont adaptées à la signature spectrale des types de végétation et qui ne sont donc pas nécessairement directement liés au contenu en carbone, et l'incohérence entre les définitions des terres forestières utilisées dans ces légendes avec les définitions utilisées dans le Protocole de Kyoto ;

- Les incertitudes dues au manque de données dans les régions qui ont une couverture nuageuse quasi-permanente, comme la partie côtière du Gabon, du Cameroun et de la Guinée Équatoriale.

De nouvelles techniques et de nouveaux jeux de données, souvent encore au stade de la recherche, ont été utilisés pour réduire ces erreurs. Des cartes forestières régionales sont actuellement basées sur une accumulation d'images Landsat (30 m de résolution spatiale), mais la typologie des forêts qui en résulte est moins détaillée que celle générée par l'utilisation d'images acquises quotidiennement. Les capteurs radars ont l'avantage d'être indépendants de la couverture nuageuse, mais leur sensibilité au terrain à échelle régionale, aux conditions d'humidité du sol et de la végétation, à la rugosité de la surface (couvert forestier, sol) et à la structure des feuilles empêchent leur utilisation

pour n'importe quelle évaluation fiable de types de forêt et de stocks de carbone.

Les changements du couvert forestier se produisent à très petite échelle et nécessitent l'utilisation d'une série chronologique d'images à haute résolution spatiale. Deux techniques principales d'extraction d'information sont disponibles :

- la différence spectrale entre les images d'un jeu de données d'une couverture exhaustive qui permet de produire une simple carte de déforestation de la zone toute entière ;
- la délimitation, sur base d'un échantillonnage, de divers types de transition basés sur des techniques de segmentation d'image, qui permet d'établir une matrice de changement plus complète, mais sur un nombre limité de sites.
- Plusieurs sources d'erreurs peuvent avoir une incidence sur les deux méthodes :
- le manque d'images satellite de la bonne année ou la bonne saison ;
- la sous-estimation de changements subtils (dégradation, reconstitution de la forêt...) par des techniques purement spectrales ;
- la densité de l'échantillonnage qui a une incidence sur la précision et l'intervalle de confiance des estimations.

La sous-estimation de changements subtils par techniques spectrales est difficile à évaluer, mais l'incertitude d'échantillonnage a quant à elle déjà été évaluée dans le bassin du Congo. Un minimum de 30 échantillons de 10x10 km est nécessaire pour estimer le taux de déforestation à un niveau régional (pays, province), avec un optimum de 50 échantillons. L'augmentation de la taille de l'échantillon ou du nombre d'échantillons peut réduire cette incertitude d'échantillonnage, comme c'est le cas pour les estimations faites par l'OFAC (échantillons de 20x20 km chaque demi-degré (+/- 55 km), ce qui donne une intensité d'échantillonnage de 16 %). Pour évaluer la zone de dégradation causée par la coupe sélective, des techniques indirectes combinant l'examen de plans de gestion forestières et d'autres rapports et la détection des pistes d'exploitation forestière pourraient être utilisées, mais avec d'énormes incertitudes.

L'évaluation directe des stocks de carbone des forêts humides denses à partir de la télédétection souffre actuellement d'erreurs majeures en raison de l'absence de relation claire et compréhensible entre les paramètres qui ont une influence sur le stock de carbone et les propriétés spectrales et de rétrodiffusion dans le domaine optique ou le domaine radar. Bien que ces relations aient été dé-

montrées dans le domaine savanique, qui a une biomasse faible à moyenne, le signal radar sature à des niveaux élevés de biomasse et les autres paramètres qui ont une influence sur les propriétés spectrales de la végétation (humidité, pente, structure de la feuille...) mènent à une grande instabilité des estimations de carbone. De nouvelles techniques telles que LIDAR peuvent améliorer la quantification des changements de stock de carbone pendant les opérations d'exploitation forestière, mais plus de recherche doivent encore être faites avant que cette technologie puisse fournir des chiffres fiables.

Encadré 12.1 : Les forêts matures du bassin du Congo absorbent-elles du carbone ou en libèrent-elles?

Environ 8 milliards de tonnes de carbone sont produites annuellement par l'activité humaine (6,3 à partir d'émissions de combustible fossile, 1,7 à partir des changements d'occupation des sols, essentiellement la déforestation dans les tropiques). Des études du cycle de carbone global démontrent qu'environ 3,2 milliards de tonnes demeurent dans l'atmosphère et 2,1 et 2,6 milliards de tonnes sont séquestrées respectivement par les puits de carbone terrestres (forêts) et marins. On estime qu'environ 2,4 milliards de tonnes de carbone étaient séquestrées dans les forêts boréales et tempérées et, marginalement, dans la végétation tropicale (Clark, 2004 et Lewis et *al.*, 2005). Toutefois, en 2001, les évaluations d'échanges de carbone dans les régions boréales n'ont pu comptabiliser qu'environ 0,7 milliard de tonnes (Myneni et *al.*, 2001). Il y avait dès lors un « puits de carbone manquant » d'environ 1,9 milliard de tonnes séquestrées dans les écosystèmes terrestres.

Deux options sont possibles pour expliquer le rôle des changements de l'occupation des sols dans les tropiques sur le rejet de carbone dans l'atmosphère :

- 1) Un important rejet de carbone dû aux changements d'occupation des sols (notamment la déforestation et la dégradation des forêts) compensé par un puits important dans la végétation tropicale intacte ;
- 2) Un rejet moins important lié aux changements d'occupation des sols avec un petit puits, ou aucun puits, dans la végétation intacte.
- 3) La première option semble la plus probable étant donné que la séquestration de carbone par les forêts tropicales intactes semble être confirmée par les résultats d'analyses récentes sur un ensemble de placettes permanentes à travers les tropiques qui démontrent un puits de carbone net estimé à environ 1 milliard de tonnes. Si on estime qu'une forêt mature intacte est en équilibre, selon l'opinion courante des forestiers, quelle serait l'explication d'une telle accumulation importante de carbone (équivalente à de la croissance) dans les forêts tropicales intactes ?

Deux hypothèses principales sont actuellement avancées :

- 1) Il y a une augmentation de la productivité primaire nette très probablement causée par la hausse de concentration du CO₂ dans l'atmosphère. La dynamique des forêts tropicales change avec une accélération de la croissance et du renouvellement (recrutement, mortalité), et le remplacement d'espèces sciaphiles à croissance lente par d'autres à tempérament héliophile et croissance rapide. L'environnement actuel avec un taux de CO₂ plus élevé est, pour le moment, favorable à la végétation tropicale (Lewis et *al.*, 2005).
- 2) Il n'y pas de réelle augmentation de la productivité primaire nette. Les forêts tropicales se reconstituent après une perturbation, d'où une augmentation importante de la biomasse au-dessus du sol et une substitution vers des espèces à croissance lente aux dépens des espèces à croissance rapide. La fréquence globale de perturbations naturelles dans les forêts intactes suggère qu'elles poussent dans un environnement de plus en plus hostile (Chave et *al.*, 2008).

En 2007 (Stephens et *al.*, 2007), une étude exhaustive d'échantillons atmosphériques a, semble-t-il, confirmé que les forêts tropicales absorbent annuellement environ 1 milliard de tonnes de plus de carbone qu'estimé auparavant (avec dans le même temps les forêts des latitudes tempérées du nord absorbant 0,9 milliard de tonnes de moins que présumé en 2001). Les résultats de cette étude sembleraient pousser en faveur de la première hypothèse, mais à l'heure actuelle, il n'est pas encore possible d'établir une conclusion définitive sur ce sujet. Les deux hypothèses peuvent être valides, mais seulement localement. Les forêts de l'Amazonie de l'Est ou de l'Ouest, des zones côtières ou intérieures d'Afrique centrale, de l'Asie du Sud-Est continentale ou insulaire, de l'Australie... suivent très probablement l'une ou l'autre de ces hypothèses, ou un mélange des deux, en fonction des conditions locales et des variations du climat à court terme. La résolution de ce problème est importante pour les scénarios de modélisation pour le futur. Les forêts tropicales séquestrent du carbone, mais pour combien de temps ? Deviendront-elles des sources nettes si la température continue d'augmenter ? Quel sera l'impact de perturbations globales plus fréquentes (El Niño, sécheresse, inondations...)?

R. Nasi 2008